

**PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM DIGESTOR ANAERÓBIO PARA O
TRATAMENTO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO
DOMÉSTICO**

FÁBIO DONATH

**ORIENTADOR: PROFESSOR DR. PAULO BELLI FILHO
CO-ORIENTADOR: ENG.º WANDERLI ROGÉRIO MOREIRA LEITE**

2010/02

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM DIGESTOR ANAERÓBIO
PARA O TRATAMENTO DO LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

FÁBIO DONATH

FLORIANÓPOLIS
2011

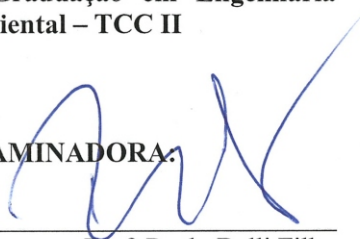
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM DIGESTOR ANAERÓBIO
PARA O TRATAMENTO DO LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

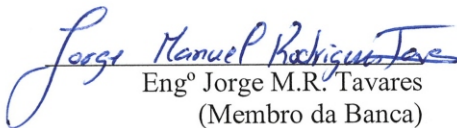
FÁBIO DONATH

**Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental – TCC II**

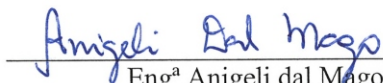
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Paulo Belli Filho
(Orientador)



Engº Jorge M.R. Tavares
(Membro da Banca)



Engª Anigeli dal Mago
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS/SC
FEVEREIRO/2011

Ficha catalográfica

Donath, Fábio

Pré-dimensionamento de um digestor anaeróbio para o tratamento do lodo de estação de tratamento de esgoto doméstico.

Fábio Donath – Florianópolis, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Título em inglês: Pre-sizing of anaerobic digester for the treatment of sludge from domestic wastewater treatment plants.

Palavras-chave: dimensionamento, digestor anaeróbio, mesofilia, tratamento de lodo adensado, biogás.

Ao apoio e incentivo de meus familiares.
Ao meu co-orientador, que muito me incentivou e acreditou em mim.

AGRADECIMENTOS

O Deus, à minha família e em especial à minha mãe (em memória).

Ao meu orientador, pela crença no trabalho e ao meu co-orientador, pelo apoio incondicional.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, pelo aprendizado vivido e conhecimento repassado.

Aos colegas de graduação, por todos os momentos e crescimentos, tanto profissionais como também pessoais.

RESUMO

A geração de lodo em estações de tratamento de esgoto doméstico é um problema de ordem mundial. Devido ao aumento dos problemas ambientais, o tratamento do lodo é considerado imprescindível e faz parte das preocupações inerentes de projeto para o tratamento de esgotos. Dentre as diversas formas de tratamento do lodo e sua disposição temos a digestão anaeróbia, a qual degrada a matéria orgânica na ausência de oxigênio molecular livre. Dentro deste contexto, o presente trabalho visou estudar a viabilidade de implantação de um digestor anaeróbio em uma estação de tratamento de esgotos, utilizando informações da própria estação e de um digestor anaeróbio piloto. Assim, foi realizado o pré-dimensionamento da unidade de digestão de lodo sob condições mesofílicas, obtendo-se dois digestores anaeróbios com volume útil de digestão de 1529,17m³ cada um. Estimou-se, a redução em volume do lodo adensado em 85m³, após a estabilização com o uso do digestor anaeróbio mesofílico.

Palavras-chave: dimensionamento, digestor anaeróbio, mesofilia, tratamento de lodo adensado, biogás.

ABSTRACT

The generation of sludge in wastewater treatment plants is a world order problem. Due to increasing environmental problems, the treatment of such waste is considered essential and it is part of the concerns inherent to the design of wastewater treatment plants. Among the various treatments and disposals for the sludge treatment, anaerobic digestion represents one option, where the organic matter is degraded in the absence of free molecular oxygen. In this context, the present work aims to study the feasibility of implementing an anaerobic digester in a wastewater treatment plant, using information from its own plant and an anaerobic digester pilot. Thus, was performed the pre-scaling unit digesting sludge under mesophilic, yielding two anaerobic digesters with a volume of digestion 1529.17m^3 each. Was estimated the reduction in volume of the thickened sludge in 85m^3 , after stabilization with the use of mesophilic anaerobic digester.

Key words: design, anaerobic digester, mesophilic, sludge thickening treatment, biogas.

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1 Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos Domésticos	4
3.2 Gerenciamento do lodo de ETE	5
3.3 Fundamentos da digestão anaeróbia	8
3.3.1 Hidrólise.....	9
3.3.2 Acidogênese	10
3.3.3 Acetogênese	10
3.3.4 Metanogênese.....	10
3.3.5 Requisitos ambientais.....	11
3.3.5.1 <i>Nutrientes</i>	11
3.3.5.2 <i>Potencial hidrogeniônico (pH)</i>	12
3.3.5.3 <i>Tempo de retenção de sólidos (TRS)</i>	12
3.3.5.4 <i>Temperatura</i>	14
3.4 Digestor anaeróbio como tecnologia de tratamento de lodo de ETEs	15
3.4.1 Digestores anaeróbios – taxa convencional.....	15

3.4.2 Digestores anaeróbios de alta taxa e simples estágio	16
3.4.3 Digestores anaeróbios de lodo de duplo estágio.....	18
3.4.4 Sistemas de mistura	18
3.4.5 Sistemas de aquecimento.....	22
3.4.6 Cobertura dos digestores	23
3.5 Geração de Biogás	23
4. METODOLOGIA	25
4.1 Área de Estudo.....	25
4.2 Parâmetros e informações utilizadas	26
4.3 Estimativas de dimensionamento do digestor	27
4.3.1 Volume do digestor	28
4.3.2 Taxas de Aplicação.....	28
4.3.3 Demais dimensões	29
4.4 Estimativas da produção de metano e de biogás	29
4.5 Quantidade de calor para os digestores	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 Área disponível na ETE	31
5.2 Configuração do sistema de digestão anaeróbia	32
5.3 Produção teórica de biogás e energia	34
5.4 Quantidade de calor para os digestores	35

5.5 Balanço energético no digestor	35
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	38
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXOS	43
APÊNDICES	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas da digestão anaeróbia (adaptado de KHANAL, 2008).	9
Figura 2: Faixas de temperatura ideais para o crescimento de microorganismos presentes nos processos anaeróbios (adaptado de Pelczar et al., 1997).	14
Figura 3: Desenho esquemático de um digestor anaeróbio do tipo taxa convencional (adaptado de Qasin, 1999).	16
Figura 4: Desenho esquemático de um digestor anaeróbio de alta taxa e simples estágio (adaptado de Qasin, 1999).	17
Figura 5: Desenho esquemático do sistema de digestão anaeróbia duplo estágio (adaptado de Qasin, 1999).	18
Figura 6: Efeitos do sistema de mistura eficientes e ineficientes no desempenho da digestão anaeróbia, para temperaturas em 35°C e 30°C (adaptado de O'Rourke, 1968).	19
Figura 7: Sistema de mistura por recirculação de biogás do tipo tubo-camisa (adaptado de Qasin, 1999).	20
Figura 8: Sistema de mistura por recirculação de biogás do tipo tubos de descarga (adaptado de Qasin, 1999).	21
Figura 9: Sistema de mistura por recirculação de biogás do tipo série de difusores.	21
Figura 10: Vista superior da ETE Insular (© GoogleEarth, 2010).	26
Figura 11: Local disponível para instalação de unidades digestoras de lodo (© Google Earth, 2010).	31
Figura 12: Porção do cone ocupada com lodo digerido e não contabilizada para digestão, enquanto a porção restante contribui para a digestão (parte do volume útil de digestão).	33
Figura 13: Balanço energético e de massa para o conjunto de dois digestores anaeróbios de simples estágio e alta taxa, mesofílicos e operando em paralelo.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lodo de ETEs, origem e características.	4
Tabela 2: Etapas de gerenciamento de lodo e fins a que se destinam.6	
Tabela 3: Processos de estabilização de lodo e níveis de atenuação típicos.	7
Tabela 4: Efeitos dos sulfetos no tratamento anaeróbico.	11
Tabela 5: TRS mínimos e desejáveis para o bom funcionamento dos digestores anaeróbios de mistura completa.	13
Tabela 6: Faixas de TRS típicos aplicados em projetos de digestores anaeróbios mesofílicos simples estágio e alta taxa.....	13
Tabela 7: Composição típica do biogás.....	23
Tabela 8: Parâmetros do Projeto da Estação de Tratamento Insular – CASAN (ENGEVIX, 1996).	26
Tabela 9: Resultados do pré-dimensionamento do digestor - valores calculados e adotados para uma unidade digestora anaeróbia de lodo.	32
Tabela 10: TASV e TVPC obtidos na fase de pré-dimensionamento.	33
Tabela 11: Produção teórica de gás metano e de biogás, em m ³ /d e m ³ /mês.	34
Tabela 12: Energia do biogás, em MJ/d, MJ/mês e kWh/mês.	35
Tabela 13: Baixa insulação, alta insulação e insulação adotada.....	35
Tabela 14: Elementos afluentes para balanço energético e de massa.	36
Tabela 15: Elementos presentes na unidade de digestão para balanço energético e de massa.	36
Tabela 16: Elementos efluentes para balanço energético e de massa	36

LISTA DE SIMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

- AGV – Ácido graxo volátil
A_L – Área lateral total
A_{LCONE} – Área lateral do cone
A_{LTAMPÃO} – Área do círculo superior
CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CH₄ – Gás metano
CaCO₃ – Carbonato de cálcio
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de carbono
C_{ST} – Concentração de sólidos totais
d – Dia
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio
Hab. – Número de habitantes
E_{AQUEC} – Energia de aquecimento do digestor
E_{BIOGÁS, E} – Energia do biogás (bruto)
E_{BIOGÁS DISPONÍVEL} – Energia de biogás disponível (considerando as perdas para o aquecimento)
E_{LODO BRUTO, A} – Potencial energético do lodo bruto afluente
E_{LODO DIGERIDO} – Potencial energético remanescente do lodo digerido
EPA – Agência de proteção ambiental norte-americana
ETE – Estação de tratamento de esgoto doméstico
FAPESC – Fundação de Amparo a Pesquisa e Extensão em Santa Catarina
g – Geratriz do cone de fundo
H_{SOBREN} – Altura reservada ao sobrenadante
H_{ESC} – Altura reservada a espuma
H₂ – Hidrogênio gasoso
H₂O – Vapor d'água
H₂S – Gás sulfídrico
L_{SV, A} – Carga de sólidos voláteis afluentes
L_{ST, A} – Carga de sólidos totais afluentes

NH_3 – Amônia
 N_2 – Nitrogênio gasoso
 $Q_{\text{LODO}, A}$ – Vazão de lodo afluente
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento
 TA_{SV} – Taxa de aplicação de sólidos voláteis
 TV_{PC} – Taxa volumétrica per capita
SF – Sólidos fixos
ST – Sólidos totais
SV – Sólidos voláteis
 $\text{SV}_{\text{CONVERT}}$ – Sólidos voláteis convertidos
 $\text{T}_{\text{MÉD FLORIANÓPOLIS}}$ – Temperatura média anual de Florianópolis
TRS – Tempo de retenção de sólidos
U – Coeficiente de insulação
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
 V_{CONE} – Volume do cone de fundo
 $\text{V}_{\text{LODO DIGERIDO}}$ – Volume de lodo digerido.

1. INTRODUÇÃO

A partir de janeiro de 2007 está em vigência no Brasil a Lei Federal 11.445/2007, que estabelece as diretrizes básicas para o saneamento básico. Foi através desta lei que a prestação dos serviços públicos de saneamento passou a atender uma série de condições mais rígidas, visando à universalidade dos serviços.

A busca pela expansão dos serviços de saneamento nas grandes cidades exige cada vez mais das empresas, órgãos e entidades ligadas a este tema a busca intensiva pela melhoria dos serviços prestados.

O relatório do Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2008) aponta que o índice médio de tratamento do volume de esgotos gerados no Brasil em 2008 foi de 34,6%, representando um acréscimo bastante significativo de 2,1 pontos percentuais em relação a 2007. A este acréscimo no volume de tratamento de esgoto está atrelado também o incremento na quantidade de subprodutos gerados a partir do tratamento.

Os subprodutos gerados a partir do tratamento de esgotos demandam um gerenciamento adequado e auto-sustentável, prevendo uma destinação final segura. Além disso, o gerenciamento deve abranger questões ambientais, sanitárias e econômicas (ANDREOLI et al, 2001).

Especificamente em estações de tratamento de esgotos domésticos (ETEs), um grande problema que surge é o lodo biológico gerado como um dos subprodutos do tratamento. As principais fontes geradoras de lodo decorrem do tratamento primário e secundário, mais especificamente do que é recolhido nas unidades de decantação (QASIN, 1999).

Dentro do contexto de estabilização da fração orgânica dos lodos resultantes do tratamento biológico de esgotos, a alternativa da digestão anaeróbia mesofílica (sob temperaturas de 30°C a 35° C) se apresenta como uma tecnologia com elevada confiabilidade e reprodutividade em todo o mundo (Metcalf & Eddy, 2003).

Além disso, Appels et al. (2008) afirmam que a digestão anaeróbia do lodo otimiza os custos das estações de tratamento de esgotos domésticos, diminui os impactos ambientais e é considerada uma importante e essencial unidade de tratamento de ETEs.

Assim, a presente pesquisa realizou o pré-dimensionamento de um digestor anaeróbio, em escala real e sob condições mesofílicas, em uma estação de tratamento de esgotos domésticos do tipo lodos ativados por

aeração prolongada, utilizando-o como ferramenta para a estabilização e redução do volume do lodo adensado gerado nas unidades de decantação do tratamento.

A pesquisa faz parte do projeto intitulado Estudos sobre Gerenciamento de Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento Esgotos Insular, pertencente à Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), por meio de seu subprojeto II: Digestão Anaeróbia de Lodo Adensado da ETE Insular/CASAN. Tal pesquisa é incentivada por meio da parceria entre CASAN, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão em Santa Catarina (FAPESC).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo pré-dimensionar um digestor anaeróbio em escala real, para o tratamento do lodo adensado produzido na ETE Insular de Florianópolis.

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar parâmetros de projeto para o pré-dimensionamento do digestor anaeróbio de lodo sob condições mesofílicas.
- Estimar a redução, em volume, do lodo adensado, após o tratamento em digestor anaeróbio sob condições mesofílicas.
- Calcular a produção teórica de biogás a partir do pré-dimensionamento efetuado, de modo a reaproveitar a energia oriunda da queima do biogás nas instalações da ETE.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos Domésticos

Entre os constituintes sólidos que são removidos em estações de tratamento de águas residuárias domésticas encontram-se: material gradeado, areia, espuma e lodo. O lodo resulta das operações e processos de tratamento das ETEs e apresenta-se geralmente na forma de um semi-sólido contendo entre 0,25% a 12% de sólidos (porcentagem em peso), variando conforme as operações e processos de tratamento utilizados. Vale ressaltar que o lodo, após processamento convenientemente, pode também ser chamado de biossólido, sendo que este termo está mais ligado ao beneficiamento ou reaproveitamento do lodo (METCALF & EDDY, 2003).

Os lodos de ETEs exigem alternativas de destinação final segura em termos de saúde pública e ambientalmente aceitáveis. Apesar de complexo e representando cerca de 20% a 60% dos custos operacionais totais das estações de tratamento de esgotos, o gerenciamento integral do lodo têm sido comumente negligenciado, principalmente nos países em desenvolvimento, como no Brasil (ANDREOLI et al., 2001).

O gerenciamento irregular dos lodos biológicos pode acabar refletindo em altos custos financeiros e ambientais, podendo comprometer todo o sistema de coleta e tratamento dos esgotos domésticos. Assim, o destino final do lodo é uma etapa de extrema importância e grande complexidade em virtude de extrapolar, muitas vezes, os limites físicos das ETEs (ANDREOLI et. al, 2001).

A Tabela 1 evidencia os tipos de lodos resultantes dos principais processos de tratamento realizados em estações de tratamento de esgotos.

Tabela 1: Lodo de ETEs, origem e características.

Subproduto sólido	Origem	Descrição
Lodo primário	Decantador primário	Formado pelos sólidos removidos por sedimentação no decantador primário. Pode exalar forte odor quando retido por longo tempo e sob temperaturas elevadas no decantador.

Subproduto sólido	Origem	Descrição
Lodo biológico aeróbio não estabilizado	Lodos ativados convencional Reatores aeróbios com biofilme – alta carga	Formado pelo lodo biológico excedente (lodo secundário), constituído por microorganismos aeróbios.
Lodo biológico aeróbio estabilizado	Lodos ativados por aeração prolongada Reatores aeróbios com biofilmes e baixa carga	Constituído geralmente por microorganismos aeróbios. A biomassa utiliza a respiração endógena, resultando em lodo com menor teor de matéria orgânica e maior teor de sólidos inorgânicos.
Lodo biológico anaeróbio	Lagoas de Estabilização Reatores Anaeróbios	Nos reatores anaeróbios e no lodo de fundo de lagoas de estabilização predominam biomassa anaeróbia, que fica retida por longo tempo, ocorrendo digestão anaeróbia do próprio material celular.
Lodo químico	Decantador primário com precipitação química Lodos ativados com precipitação química de fósforo	Resultante da precipitação química com sais metálicos ou cal. Menor preocupação com maus odores, exceto quando a cal é usada como coagulante.

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy, 2003.

3.2 Gerenciamento do lodo de ETE

As alternativas de tratamento e disposição final do lodo de esgoto são bastante complexas em virtude da grande gama de fatores envolvidos: técnicos, econômicos, ambientais e legais. Tais fatores muitas vezes perpassam os limites das ETEs e acabam sendo negligenciados ou gerenciados de forma emergencial, acabando por representar cerca de 60% dos custos envolvidos até a sua destinação

final. A escolha da opção de gerenciamento deve ser integrante do projeto da ETE, o qual deve considerar a qualidade do esgoto a ser tratado, as opções de tratamento disponíveis e aplicáveis, o gerenciamento do lodo e seu destino final (ANDREOLI et al., 2001).

As principais etapas do gerenciamento do lodo e seus respectivos objetivos principais são evidenciados na Tabela 2.

Tabela 2: Etapas de gerenciamento de lodo e fins a que se destinam.

Etapas de gerenciamento	Objetivo
Adensamento	Remoção de umidade
Estabilização	Remoção de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
Condicionamento	Preparação para a desidratação (principalmente mecânica)
Desaguamento	Remoção de umidade (redução de volume)
Higienização	Remoção de microorganismos patogênicos
Disposição final	Destinação final dos subprodutos

Fonte: VON SPERLING, 2000.

Adensamento é um procedimento usado para incrementar o teor de sólidos do lodo por meio da remoção de uma fração líquida, obtendo também uma redução de volume. Esta redução volumétrica é benéfica para a sequência do processo de tratamento, como a digestão anaeróbia, desaguamento, higienização, entre outros. Dentre as formas de se realizar o adensamento de lodo, tem-se: adensamento por gravidade, adensamento por flotação e adensamento por centrífugas (METCALF & EDDY, 2003).

A etapa seguinte, de estabilização do lodo, visa à redução de patógenos, eliminação de odores ofensivos e diminuição do potencial de putrefação deste resíduo (METCAL & EDDY, 2003). Segundo Ludovice (2001), os processos de estabilização do lodo podem ser divididos em: estabilização biológica, estabilização química e estabilização térmica.

A Tabela 3 mostra os principais processos de estabilização dos lodos de ETEs e seus níveis de atenuação.

Tabela 3: Processos de estabilização de lodo e níveis de atenuação típicos.

Processo	Nível de atenuação		
	Patógenos	Putrefação	Potencial odorante
Estabilização alcalina	Bom	Razoável	Razoável
Digestão anaeróbia	Razoável	Bom	Bom
Digestão aeróbia	Razoável	Bom	Bom
Digestão termofílica autotermal	Excelente	Bom	Bom
Compostagem	Razoável	Bom	Ruim a razoável
Compostagem termofílica	Excelente	Bom	Ruim a razoável

Fonte: VON SPERLING (2000)

Segundo Gavala et al. (2003), a digestão anaeróbia é uma técnica adequada para o tratamento de lodos de esgotos antes de sua disposição final, sendo vislumbrada em todo o mundo como o mais antigo e importante processo de estabilização dos lodos.

Grandes progressos se têm obtido para aperfeiçoamento da tecnologia dos digestores anaeróbios e para o controle do processo, desde o tamanho dos reatores até o projeto e aplicação dos equipamentos. Devido às evidentes ênfases na recuperação e conservação de energia e ao desejo do uso do lodo de forma a não comprometer o meio ambiente, a digestão anaeróbia continua sendo o processo dominante para a estabilização do mesmo (METCALF & EDDY, 2003).

O condicionamento do lodo objetiva aumentar a aptidão ao desaguamento e à captura de sólidos, por meio da utilização de produtos químicos (polímeros orgânicos) que beneficiarão a redução do volume de lodo nas etapas seguintes do gerenciamento (ANDREOLI, 2001). É uma etapa essencial, principalmente quando o desaguamento ocorrer por meios mecânicos.

Para Metcalf & Eddy (2003), o desaguamento (ou desidratação) é uma operação física usada para reduzir a umidade presente no lodo, que por sua vez, resulta em vantagens no manejo deste subproduto, tais como:

- O custo do transporte do lodo para a sua disposição final torna-se mais barato quando o volume é reduzido por desaguamento.

- O lodo desaguado é geralmente mais fácil de ser gerenciado quando comparado com o lodo adensado. Em muitos casos, o lodo desidratado pode ser recolhido com pás, tratores, e de forma adaptada com baldes e rodos, e transportado por correias transportadoras.
- A desidratação é normalmente requerida anteriormente ao processo de incineração do lodo para aumentar o poder calorífico por meio da remoção da umidade excessiva.

A higienização consiste em uma etapa conjugada ou complementar aos processos convencionais (digestão anaeróbia ou aeróbia) para a redução da concentração de parasitas intestinais e microorganismos patogênicos. Reduzir a patogenicidade do lodo a níveis que não venham causar riscos à saúde da população, conforme as exigências para cada forma de reaproveitamento do lodo (PINTO, 2003).

De acordo com Andreoli (2001), a destinação final do lodo gerado ocorre principalmente por três processos: incineração, disposição em aterros sanitários e uso agrícola. Para a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana – Environmental Protection Agency (EPA, 1993), a forma predominante de disposição final do lodo é o uso agrícola, adotado em aproximadamente 55,5% do lodo produzido nos Estados Unidos, devendo alcançar 61,5% até 2010. Ressalta-se que a Europa, a reciclagem e a disposição em aterros sanitários são as alternativas predominantes, contemplando cerca de 40% do lodo produzido neste continente. Em todo o planeta, a alternativa que possui mais perspectiva de desenvolvimento é a reciclagem agrícola, pois há uma crescente demanda pela produção de alimentos que pode ser beneficiada pela utilização do lodo como fonte de macro e micronutrientes (ANDREOLI, 2001).

3.3 Fundamentos da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia tem sido utilizada com sucesso para estabilizar o lodo de ETEs por mais de 60 anos (Parkyn et al., 1987). Trata-se do processo de degradação da matéria orgânica em ambientes anaeróbios, onde ocorrem atividades metabólicas de fermentação e respiração. Representa um sistema ecológico delicadamente balanceado, envolvendo processos metabólicos complexos, que ocorrem em etapas

seqüenciais e que dependem da atividade de muitos tipos de microorganismos: hidrolíticos, bactérias fermentativas (acidogênicas), bactérias acetogênicas, microorganismos metanogênicos e bactérias redutoras de sulfato (CHERNICHARO, 2007).

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), tem-se algumas vantagens do processo anaeróbio quando comparada com outras formas de tratamento, dentre elas: baixa produção de lodo biológico; baixa quantidade de energia para o funcionamento; poucos nutrientes requeridos e produção de metano (CH_4), que pode servir como fonte de energia. Como desvantagem tem-se o grande volume necessário à digestão e o tempo de degradação mais lento.

A Figura 1 mostra todas as etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbia.

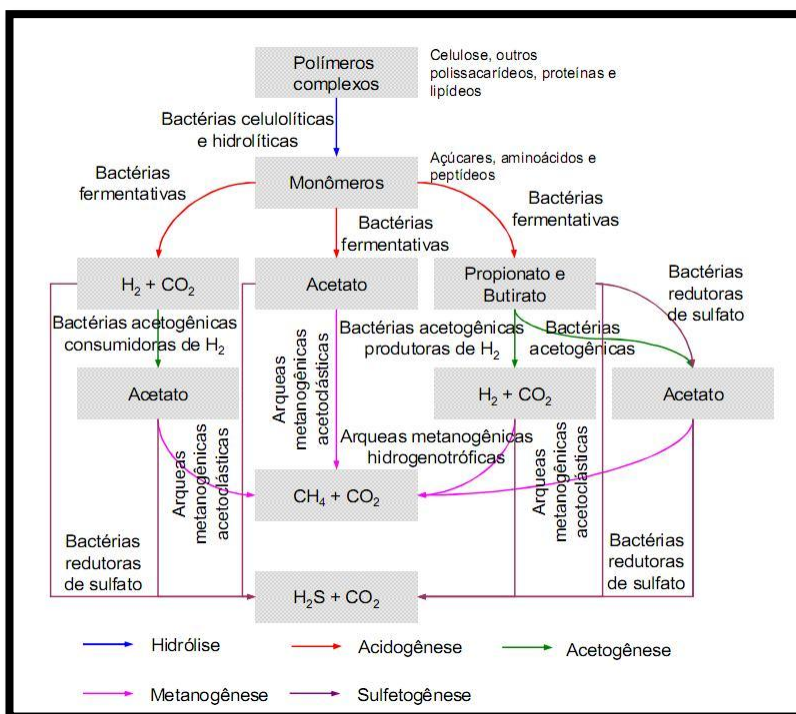


Figura 1: Etapas da digestão anaeróbia (adaptado de KHANAL, 2008).

3.3.1 Hidrólise

Constitui-se na primeira etapa da digestão anaeróbia, em que o material particulado complexo é convertido em compostos solúveis mais simples que podem então ser utilizados pelas bactérias que realizam a fermentação (METCALF & EDDY, 2003).

Conforme APPELS et al. (2008), a hidrólise é a etapa de degradação da matéria orgânica insolúvel e com componentes de alto peso molecular como lipídios, polissacarídeos e ácidos nucleicos em substâncias orgânicas solúveis, como os aminoácidos e ácidos graxos.

3.3.2 Acidogênese

Os produtos solúveis originados na fase anterior (hidrólise) são utilizados pelos microorganismos acidogênicos, que realizam o metabolismo fermentativo no interior das células. A maioria dos microorganismos acidogênicos fermenta açúcares, aminoácidos e ácidos graxos e produzem compostos orgânicos mais simples como: NH_3 , CO_2 , ácidos graxos voláteis (AGVs), ácido sulfídrico (H_2S), alcoóis, entre outros (CHERNICHARO, 2007).

3.3.3 Acetogênese

Constitui-se na etapa reguladora do processo em virtude de possibilitar a transformação de produtos da acidogênese em ácido acético (precursor da formação do metano) através da ação das bactérias sintotróficas, prevenindo contra o acúmulo de AGVs, que podem funcionar como inibidores da etapa final da digestão anaeróbia, demandando sua transformação em ácido acético, H_2 e CO_2 (BELLI FILHO, 1995).

Esta conversão de AGVs e demais produtos da acidogênese é controlada em grande parte por meio da pressão parcial de H_2 presente na mistura (APPELS et al., 2008).

3.3.4 Metanogênese

É a última etapa da digestão anaeróbia, na qual ocorre a conversão de compostos originados na etapa da acetogênese em biogás (CH_4 , CO_2 e outros gases) (CHERNICHARO, 2007). A metanogênese é conduzida por dois grupos de organismos:

- metanogênicos acetoclásticos: transformam acetato em CH_4 e CO_2 ;

- metanogênicos hidrogenotróficos: utilizam H_2 como doador de elétrons e CO_2 comoceptor de elétrons para produção de metano.

Dentre os gêneros típicos de microorganismos que se tem encontrado em condições mesofílicas anaeróbias, pode-se citar: *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus*, *Methanothrix* e *Methanosarcina* (METCALF & EDDY, 2003).

Compostos a base de enxofre e sulfatos são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Tais compostos são reduzidos a sulfeto por meio de bactérias anaeróbias específicas, denominadas bactérias redutoras de sulfato. O aspecto negativo da sulfetogênese está no fato da competição entre metanogênicas e sulfetogênicas pelo uso do acetato e hidrogênio, sendo que a determinação de qual processo irá ocorrer será justamente a presença de substrato. Em outras palavras, pode-se dizer que a produção de CH_4 pode ficar comprometida quando houver excesso de sulfatos.

Em virtude disso, a sulfetogênese é considerada indesejável para o processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica (CHERNICHARO, 2007).

A presença de sulfetos dissolvidos (solúveis) e seus respectivos efeitos na metanogênese podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Efeitos dos sulfetos no tratamento anaeróbio.

Concentração de sulfetos solúveis (mg/L)	Efeitos na metanogênese
Até 50	Nenhum efeito observado
50 a 100	É tolerável com pouca ou nenhuma aclimação
Até 200	É tolerável com aclimação
Acima de 200	Produz efeitos bastante tóxicos

3.3.5 Requisitos ambientais

3.3.5.1 Nutrientes

Para que os processos biológicos ao longo do tratamento ocorram com sucesso torna-se imprescindível que os nutrientes necessários ao crescimento microbiano sejam fornecidos em quantidades suficientes. Os esgotos domésticos, na grande maioria dos casos, apresentam todos

os tipos de nutrientes em concentrações adequadas que não influencia nos processo de digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 2007).

A menor velocidade de desenvolvimento dos microorganismos anaeróbios, em comparação com os microorganismos aeróbios, resulta em demandas nutricionais reduzidas. (SPEECE, 1996 apud CAMPOS, 1999). O nitrogênio, por sua vez, deve estar presente em maiores concentrações (quando comparado com outros nutrientes), a fim de estimular o crescimento dos microorganismos. Como o nitrito e o nitrato, em condições anaeróbias, não estão disponíveis para serem assimilados pelos microorganismos – são reduzidos a nitrogênio gasoso (N_2) e liberados na atmosfera – a amônia e a parcela de nitrogênio orgânico são as principais fontes de nitrogênio que se apresentam (CHERNICHARO, 2007).

A concentração de fósforo requerida pelos microorganismos anaeróbios corresponde a cerca de 1/5 a 1/7 da concentração do nitrogênio requerido. Já o enxofre (sob a forma de sulfeto e cisteína) é utilizado pelos microorganismos anaeróbios e desempenha um importante papel na síntese de proteínas (CHERNICHARO, 2007).

3.3.5.2 Potencial hidrogeniônico (pH)

Segundo Appels et al. (2008), cada grupo de microorganismos possuem distintas faixas ótimas de pH. As bactérias metanogênicas, por exemplo, são bastante sensíveis a este parâmetro e possuem uma faixa ideal entre 6,5 e 7,2. Os microorganismos fermentativos, por sua vez, são menos sensíveis que os metanogênicos e atuam sob uma gama mais ampla de pH, entre 4,0 e 8,5.

O pH pode afetar diretamente a atividade enzimática como também indiretamente, variando a toxicidade de algumas substâncias e compostos químicos. (CHERNICHARO, 2007).

Segundo Qasin (1999), com o pH atingindo valores inferiores a 6,0 a produção de metano é cessada. Em casos mais extremos, a diminuição acentuada do pH pode inviabilizar todo o processo (Sousa, 2008).

Os ácidos graxos voláteis (AGVs), produzidos durante a acidogênese, tendem a reduzir o pH. Esta redução de pH é normalmente contrabalanceada pelas atividades das bactérias metanogênicas, que acabam produzindo alcalinidade na forma de CO_2 , NH_3 e $CaCO_3$.

3.3.5.3 Tempo de retenção de sólidos (TRS)

O tempo de retenção de sólidos é o tempo médio em que os sólidos devem permanecer em processo de digestão. É imprescindível que haja um período suficiente de residência do lodo presente no digestor (sob mistura) para permitir uma degradação suficiente dos sólidos suspensos voláteis. O TRS é o principal parâmetro e serve como critério de dimensionamento para os digestores anaeróbios de lodo de uma forma geral (Metcalf & Eddy, 2003).

$$V = Q \cdot TRS \leftrightarrow TRS = \frac{V}{Q}$$

A Tabela 5 apresenta os TRS mínimos e desejáveis para operação dos digestores.

Tabela 5: TRS mínimos e desejáveis para o bom funcionamento dos digestores anaeróbios de mistura completa.

Temperatura de operação (°C)	TRS mínimo (dias)	TRS desejável (dias)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

Fonte: adaptado de McCarty, 1968.

A Tabela 6 apresenta os TRS utilizados geralmente para projeto, isto é, para o dimensionamento dos digestores anaeróbios de simples estágio e alta taxa.

Tabela 6: Faixas de TRS típicos aplicados em projetos de digestores anaeróbios mesofílicos simples estágio e alta taxa.

	Valor	Unidade	Referência
TRS	15-20	dias	US-EPA (1980)
	10-20	dias	Qasin (1999)

Segundo Parkin & Owen (1987), o TRS está entre os fatores chave do sucesso do crescimento dos microorganismos. Por meio do

TRS assegura-se uma eficiente conversão da matéria orgânica complexa em biogás (CH_4 , CO_2 e outros gases). A população de bactérias precisa estar em quantidade e concentração suficientes, bem como possuírem um TRS adequado e que permita o metabolismo do substrato.

3.3.5.4 Temperatura

Dentre os fatores físicos que interferem no desenvolvimento dos microorganismos anaeróbios, a temperatura é considerada como um parâmetro de suma importância, visto que os microorganismos não conseguem controlar a temperatura interna de suas células (CHERNICHARO, 2003).

Para Pelczar et al. (1997), ocorrem basicamente três faixas de temperatura associadas ao desenvolvimento dos microorganismos anaeróbios:

- **Faixa psicrófila:** até cerca de 20°C;
- **Faixa mesófila:** entre 20°C e 40°C – Segundo Campos (1999), esta é a faixa mais comum de temperatura utilizada nos tratamentos anaeróbios, principalmente em países tropicais e subtropicais;
- **Faixa termófila:** a partir de 40°C até em torno de 70°C.

Para cada uma dessas faixas existem pontos (valores) de temperatura em que o desenvolvimento microbiológico é ótimo. Para a faixa mesófila, a produção de metano ocorre na faixa ótima de 30°C a 40°C (CHERNICHARO, 2003).

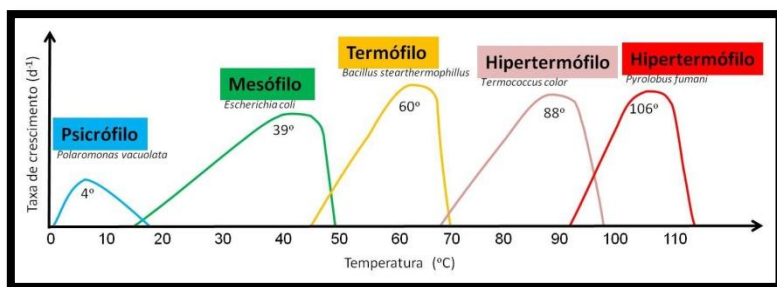


Figura 2: Faixas de temperatura ideais para o crescimento de microorganismos presentes nos processos anaeróbios (adaptado de Pelczar et al., 1997).

Segundo Nogueira apud Alves 2007, os digestores anaeróbios tem sido projetados para operarem dentro da faixa mesófila, visto que é

neste intervalo que ocorrem as melhores condições para o desenvolvimento dos microorganismos metanogênicos e com menor TRS. Adota-se raramente a faixa termófila em virtude de as bactérias serem mais sensíveis a variações ambientais, ao incremento de energia para a operação neste patamar de temperatura e à baixa taxa de produção líquida (que aumenta o tempo de partida do digestor).

3.4 Digestor anaeróbio como tecnologia de tratamento de lodo de ETEs

A digestão anaeróbia está entre os processos mais antigos e de grande importância, sendo ainda utilizados para a etapa de estabilização de lodos em estações de tratamento de esgotos domésticos. As maiores aplicações dos digestores anaeróbios residem na estabilização de lodos adensados gerados como resíduos em ETEs (METCALF & EDDY, 2003). Além disso, a digestão anaeróbia de lodos de esgoto gera como subproduto o biogás, o qual pode ser utilizado como fonte de energia para a estação de tratamento ou na própria unidade de estabilização do lodo. Os parâmetros mais importantes a serem considerados no interior dos digestores anaeróbios que tratam lodos de ETEs são: TRS, temperatura, pH, disponibilidade de nutrientes, conforme explicados anteriormente (METCALF & EDDY, 2003).

Dentre os principais tipos de digestores anaeróbios elencados por Qasin (1999), pode-se citar:

- Digestor anaeróbio de lodo de taxa convencional: sem os sistemas de aquecimento e mistura;
- Digestor anaeróbio de simples estágio e alta taxa: contendo os sistemas de aquecimento e mistura;
- Digestores de lodo tipo duplo estágio: trata-se de uma combinação dos dois digestores citados anteriormente e ligados em série.

3.4.1 Digestores anaeróbios – taxa convencional

Segundo Qasin (1999), trata-se do mais simples tipo de digestor anaeróbio para o tratamento do lodo e na maior parte dos casos não são projetados com sistemas de aquecimento (em alguns casos pode haver um sistema de troca de calor) e mistura, tratando baixas cargas (daí o nome de taxa convencional. Apresentam estratificação em 4 camadas, são elas:

- Zona superficial de espuma;

- Zona de líquido sobrenadante, localizada abaixo da camada de espuma;
- Zona ativa de digestão dos sólidos, localizada abaixo da camada de líquido sobrenadante;
- Zona de fundo ou Zona de lodo estabilizado (camada de sólidos inertes).

O lodo bruto deve ser inserido em meio à zona de digestão ativa e que ocorre a formação de biogás. O movimento ascendente do biogás aliado a falta de agitação fazem com que se formem as camadas de espuma e de líquido sobrenadante. O lodo mineralizado e mais denso acumula-se na zona de lodo estabilizado, de onde é removido para a etapa de desaguamento (CHERNICHARO, 2007).

A Figura 3 mostra esquematicamente a estrutura de um digestor anaeróbio de lodo do tipo taxa convencional.

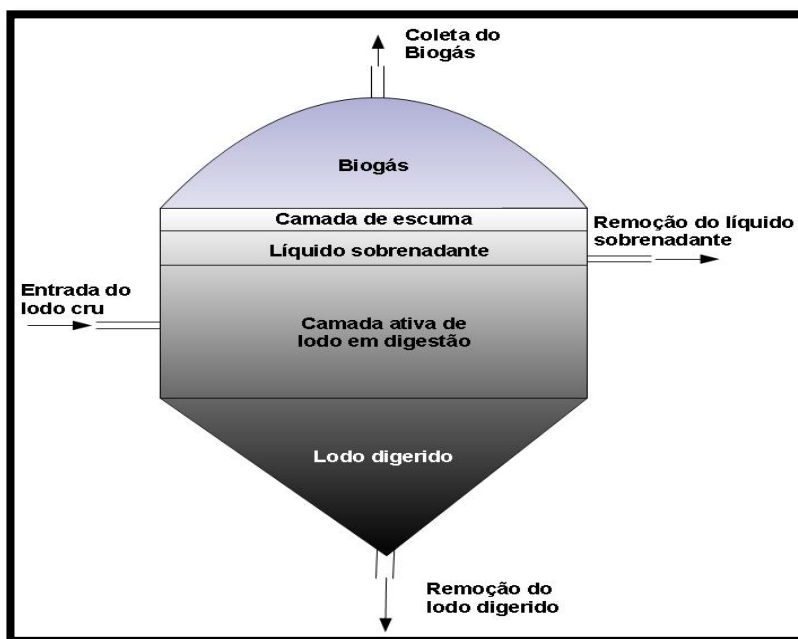


Figura 3: Desenho esquemático de um digestor anaeróbio do tipo taxa convencional (adaptado de Qasin, 1999).

3.4.2 Digestores anaeróbios de alta taxa e simples estágio

O digestor anaeróbio de alta carga e simples estágio é caracterizado pela incorporação de sistemas de aquecimento e de mistura, sendo operado com taxas de alimentação uniforme e com lodo pré-adensado, de forma a conseguir uma melhor uniformidade em todo o digestor. Com isso, obtêm-se tamanhos menores deste tipo de digestores e a estabilidade do processo é melhorada (CHERNICHARO, 2007).

Não ocorre a formação de camadas devido à eficiência do sistema de mistura. A alimentação e a descarga são normalmente contínuas e de mesma intensidade, com uma remoção de sólidos voláteis na ordem de 45% a 50% (NUVOLARI, 2003).

A Figura 4 mostra um digestor anaeróbio de alta carga e simples estágio típico.

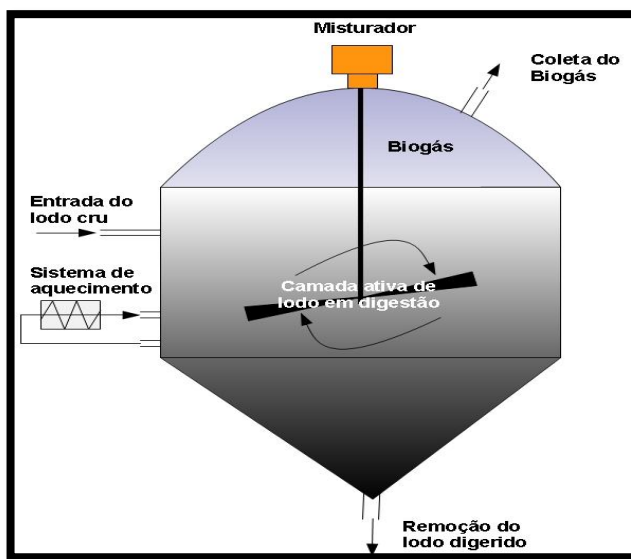


Figura 4: Desenho esquemático de um digestor anaeróbio de alta taxa e simples estágio (adaptado de Qasin, 1999).

A alimentação constante é muito importante para o processo, sendo recomendado alimentar o reator com lodo de maneira contínua ou em tempos de ciclo de 30 minutos até 2 horas, fazendo com que haja uma manutenção das condições no reator.

3.4.3 Digestores anaeróbios de lodo de duplo estágio

Trata-se do funcionamento em série de um digestor anaeróbio simples estágio e alta taxa seguido de um outro digestor anaeróbio funcionando como digestor anaeróbio de taxa convencional. No primeiro digestor operam os sistemas de mistura e de aquecimento com controle de temperatura, enquanto que no segundo digestor ocorre a separação dos sólidos digeridos do líquido sobrenadante (NUVOLARI, 2003).

Geralmente, os tanques são idênticos e dotados dos mesmos dispositivos e sistemas, podendo assim funcionar tanto como primeiro estágio como também como segundo estágio, facilitando a operacionalização.

A Figura 5 ilustra o digestor anaeróbio de duplo estágio.

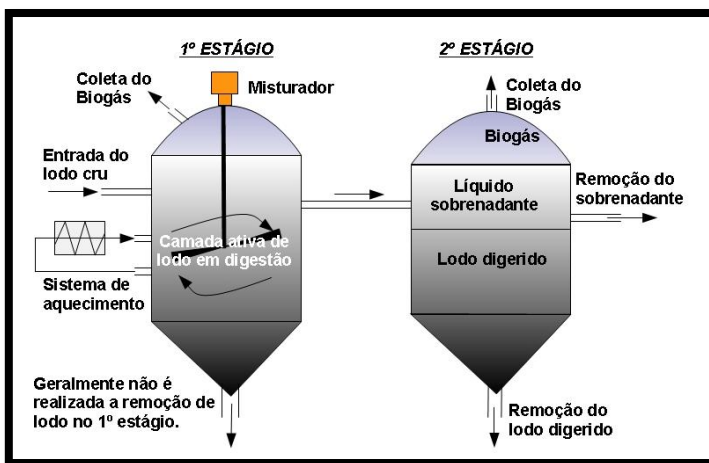


Figura 5: Desenho esquemático do sistema de digestão anaeróbia duplo estágio (adaptado de Qasin, 1999).

3.4.4 Sistemas de mistura

As principais razões para a utilização dos sistemas de mistura dos lodos de ETEs são (Parkyn & Owen, 1987):

- proporcionar uma eficiente utilização de todo o volume do digestor;
- evitar a estratificação e os gradientes de temperatura,
- dispersar os produtos metabólicos finais;

- dispersar elementos tóxicos que porventura entrem no digestor;
- promover um contato íntimo entre os microorganismos, bactérias e enzimas com os seus substratos;
- manter um ambiente interno homogêneo, tão essencial para uma eficaz digestão.

Os efeitos de uma mistura ineficiente combinados com uma queda na temperatura podem ser observados na Figura 6.

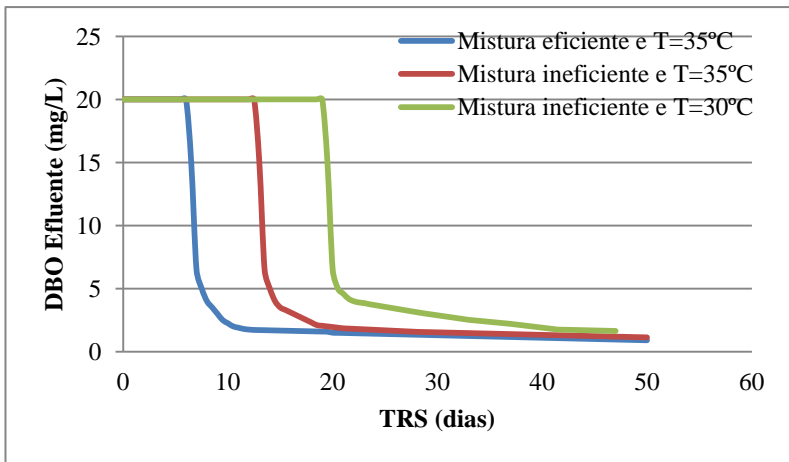


Figura 6: Efeitos do sistema de mistura eficientes e ineficientes no desempenho da digestão anaeróbia, para temperaturas em 35°C e 30°C (adaptado de O'Rourke, 1968).

Os principais tipos de sistemas de mistura utilizados são (Nuvolari, 2003):

- *Sistemas externos de bombeamento*: baseiam-se na recirculação, por meio de bombas, de uma considerável vazão de lodo. Em virtude de demandarem grande quantidade de energia estão deixando de serem adotados.
- *Misturadores mecânicos internos*: são geralmente instalados em colunas tubulares e promovem a mistura vertical. Apresenta dificuldades em virtude da quantidade e das características dos sólidos presentes, que aderem as hélices e podem provocar falhas no mecanismo.

- *Misturadores por recirculação do próprio gás*: trata-se do método mais utilizado e que demonstra melhor eficiência. Utilizam invariavelmente um compressor de gás situado na parte externa do digestor. Dentre os arranjos mais comuns (Qasin, 1999):
 - *Tipo tubo-camisa*: Injeção do gás por meio de tubo encamisado central e retorna verticalmente pelo tubo camisa, criando condições de bombeamento tipo pistão e promovendo adequado grau de mistura (Figura 7).

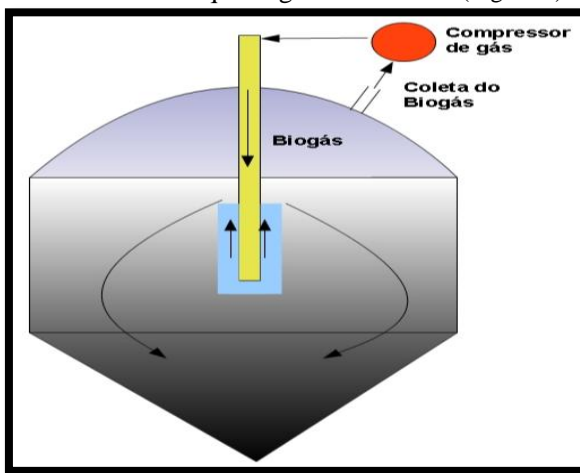


Figura 7: Sistema de mistura por recirculação de biogás do tipo tubo-camisa (adaptado de Qasin, 1999).

- *Tipo série de tubos de descarga*: a injeção do gás ocorre por meio de uma série de tubos presos a cobertura do digestor, devendo alcançar a maior profundidade possível (Figura 8).

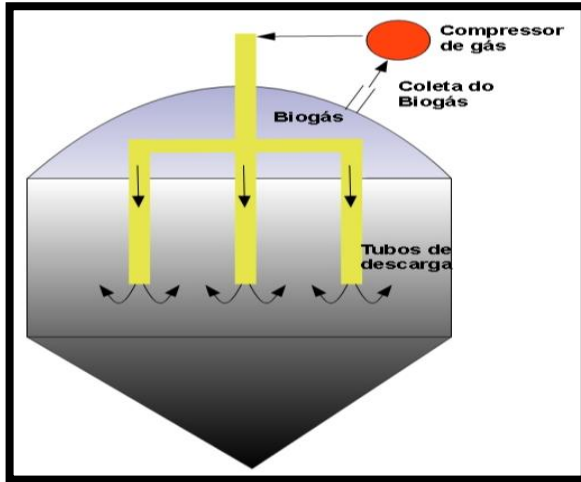


Figura 8: Sistema de mistura por recirculação de biogás do tipo tubos de descarga (adaptado de Qasin, 1999).

- *Tipo série de difusores:* o gás comprimido é injetado com o uso de tubulações dotadas de difusores nas extremidades, localizados na parte inferior do digestor (Figura 9).

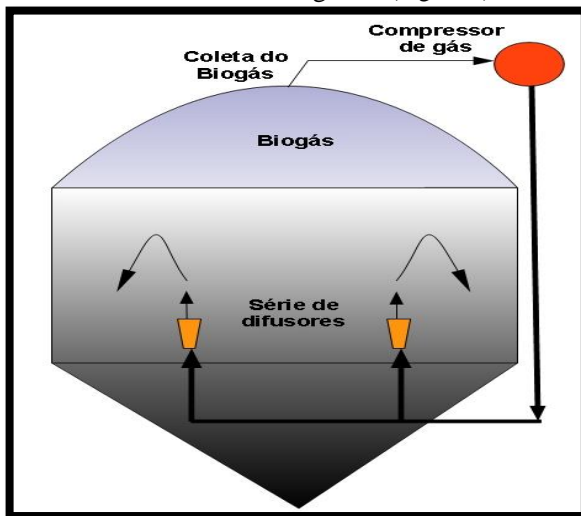


Figura 9: Sistema de mistura por recirculação de biogás do tipo série de difusores.

3.4.5 Sistemas de aquecimento

A taxa de crescimento bacteriano e de estabilização biológica estão diretamente atreladas à temperatura do sistema.

Segundo Qasin (1999), os tipos de sistemas de aquecimento mais comumente utilizados são:

- *Serpentinas permutadoras de calor (internas ao digestor)*: método antigo, em que ocorriam problemas justamente devido ao fato de serem internas aos digestores, como incrustações e problemas operacionais.
- *Injeções diretas de vapor*: ocorre bombeamento de vapor diretamente em meio ao lodo e promovendo o aquecimento. A vantagem é não necessitar de permutadores de calor (de manutenção problemática). Entretanto, a principal desvantagem é a transformação do vapor em líquido e causando diluição da massa de lodo.
- *Trocadores de calor*:
 - *Banho-maria*: os tubos de aquecimento e de lodo são colocados lado a lado, em um reservatório com água.
 - *Tubo-camisa*: a água quente é bombeada contra corrente por um tubo-camisa que envolve a tubulação de lodo.
 - *Espiral*: ocorre também bombeamento contra-corrente, sendo que as tubulações ficam dispostas em espiral.

Em projetos, para o correto dimensionamento dos sistemas de aquecimento, devem-se levar em conta as perdas de calor na superfície do digestor e a temperatura do ar e do lodo em si (ANDREOLI, 2001).

Segundo APPELS (2008), a quantidade necessária de energia para aquecer o lodo a temperatura de funcionamento dos digestores pode ser obtida por meio da equação abaixo:

$$Q = M_f \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) + U \cdot A \cdot (T_4 - T_3) \cdot 86,4$$

Onde:

Q: demanda diária de calor do digestor (kJ/d)

M_f: massa de lodo adensado a alimentar o digestor (kg/d)

C_p: calor específico da água (kJ/kg °C)

T_2-T_1 : diferença entre a temperatura do lodo adensado e a temperatura do digestor

U: coeficiente de transferência de calor ($J/s \cdot m^2 \cdot ^\circ C$)

A: área da superfície externa do digestor (m^2)

T_4-T_3 : diferença entre a temperatura interna do digestor e a temperatura ambiente externa ($^\circ C$)

3.4.6 Cobertura dos digestores

Os digestores são cobertos para manter a temperatura de operação, as condições anaeróbias de digestão e promover ainda a coleta do biogás gerado no digestor. (Appels, 2008).

Os digestores de teto fixo são de menor custo de implantação, operação e manutenção, mantendo nível constante no tanque. São geralmente construídos em concreto, apesar de o H_2S promover o ataque as paredes do digestor (Qasin, 1999).

As coberturas flutuantes, por sua vez, são mais onerosas, porém permitem maior flexibilidade nas operações de descarga de lodo e impedem a entrada de ar, reduzindo os riscos de formação de mistura explosiva entre o biogás e o ar atmosférico (Nuvolari, 2003).

A pressão de biogás dentro da cobertura dos digestores são tipicamente na faixa de 0 – 3,7 kN/m^2 (Qasin, 1999).

3.5 Geração de Biogás

O biogás (gás produzido durante o processo de digestão anaeróbia) é formado majoritariamente por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), seguido em menores concentrações por N_2 , H_2 , H_2S , O_2 e vapor d'água, além de traços de compostos orgânicos voláteis (COVs). Possui uma densidade relativa em torno de 0,86. (Andreoli et al., 2001).

Tabela 7: Composição típica do biogás.

Gás	% em volume
CH_4	62-70
CO_2	30-38
H_2S	50-3000ppm

Gás	% em volume
N ₂	0,022
O ₂	<0,01
Vapor d'água	Saturação

Fonte: adaptado de ANDREOLI et al. (2001).

Segundo Metcalf & Eddy, com uma concentração média de CH₄ de 65%, o valor do aquecimento é de aproximadamente 21-25MJ/m³. Comparativamente, é cerca de 30-40% menor do que o energético do gás natural (37,3MJ/m³). O biogás purificado pode ainda ser utilizado como substituto para o gás natural, reduzindo assim as quantidades de gases de efeito estufa na atmosfera (MORIN et al., 2010).

Para Ludovice (2001), tais valores energéticos do biogás validam-no como fonte energética para o próprio digestor ou mesmo para as instalações da ETE em questão.

4. METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo

A Estação de Tratamento de Esgotos Insular – ETE Insular está situada no município de Florianópolis/SC, as margens da Baía Sul. A Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) é a responsável pelo funcionamento e operação desta estação, desde a sua inauguração em outubro de 1997.

A ETE Insular atende aproximadamente 200.000 habitantes e possui uma vazão $Q=300\text{L/s}$, abrangendo alguns bairros, tais como: Agronômica, Centro, Carvoeira, Córrego Grande, Costeira do Pirajubaé, Itacorubi, Jardim Anchieta, Pantanal e Santa Mônica.

Possui um sistema de tratamento do tipo lodos ativados por aeração prolongada, formado por:

- Tratamento Preliminar: gradeamento e caixa de areia (desarenador).
- Tratamento Secundário: 2 seletores biológicos, 2 tanques de aeração e 3 decantadores secundários.
- Tratamento terciário: realizada através da cloração do efluente final.
- Emissário submarino: lançamento do efluente final tratado no corpo receptor (Baía Sul).

Quanto ao gerenciamento do lodo na ETE Insular, a estação possui dois adensadores e uma unidade desaguadora de lodo por meio de 2 prensas hidráulicas.

Ocorre ainda a recirculação de uma parte do lodo excedente para de volta ao tratamento – tratamento por lodos ativados.

A Figura 10, a seguir, mostra a ETE Insular, em Florianópolis, com cada uma das unidades de tratamento em evidência.



Figura 10: Vista superior da ETE Insular (© GoogleEarth, 2010).

4.2 Parâmetros e informações utilizadas

A viabilidade de implantação em escala real de um digestor anaeróbio para tratar o lodo produzido na ETE Insular será baseada nos dados e informações de parâmetros operacionais vigentes na referida ETE. Tais dados foram obtidos por meio do Laboratório de Análises Físico-Químicas e Hidrobiológicas da ETE Insular, compreendendo dados desde janeiro de 2010 até agosto de 2010 e encontram-se nos anexos de A a G.

Também, obteve-se informações básicas acerca da concepção original do projeto da ETE Insular, obtidos por meio da empresa ENGEVIX Engenharia S/C Ltda. A Tabela 8 ressalta as informações e parâmetros de projeto obtidos para a 2ª etapa de implementação da referida estação.

Tabela 8: Parâmetros do Projeto da Estação de Tratamento Insular – CASAN (ENGEVIX, 1996).

DESCRIÇÃO	UNIDADE	2ª ETAPA (2001 – 2020)
População a ser atendida	Número de	225.000

DESCRIÇÃO	UNIDADE	2ª ETAPA
		(2001 – 2020)
	habitantes	
Vazão média diária	L/s	417
Vazão máxima diária	L/s	626
Carga orgânica média afluente ao sistema de tratamento	kgDBO ₅ /d	10.809
Carga orgânica removida no sistema de tratamento	kgDBO ₅ /d	10.377
Carga orgânica remanescente no efluente tratado	kgDBO ₅ /d	432
Carga de nitrogênio orgânico total	kgNTK/d	Zero
Eficiência média de remoção de DBO ₅	%	96
Eficiência máxima de remoção de DBO ₅	%	98
Volume de lodo adensado produzido no sistema	m ³ /d	401
Volume de lodo efluente da desidratação	m ³ /d	56
Eficiência máxima da remoção de SST	%	97
Eficiência média da remoção de SST	%	94
Eficiência da remoção de coliformes totais no tratamento secundário, com nitrificação	%	90 – 99
Concentração mínima de DBO ₅ no efluente tratado	mg/L	6
Concentração média anual de DBO ₅ no efluente tratado	mg/L	10 – 14
Concentração mínima de SST no efluente tratado	mg/L	9
Concentração média de SST no efluente tratado	mg/L	18

4.3 Estimativas de dimensionamento do digestor

Metcalf & Eddy (2003) afirmam que o uso de digestores anaeróbios mesofílicos constitui-se na tecnologia mais amplamente empregada no mundo para a estabilização do lodo em ETEs.

Bolzonella et al. (2005) confirma o uso de digestores anaeróbios mesofílicos em quatro importantes estações de tratamento de águas residuárias, sendo um deles operando em escala laboratorial.

Digestores anaeróbios de alta taxa são aquecidos e o lodo é completamente misturado, com alimentação uniforme. O conjunto destes elementos resultam em digestores com dimensões reduzidas (quando comparadas com as dimensões de digestores de baixa taxa) e o processo de estabilização e eficiência são maximizados Appels et al. (2008).

Assim, optou-se neste estudo pela utilização do digestor anaeróbio de simples estágio e alta taxa, de formato cilíndrico e com sistema de aquecimento e mistura.

4.3.1 Volume do digestor

Para fins de pré-dimensionamento, a obtenção do volume do digestor V_T foi realizada por meio da seguinte equação:

$$TRS = \frac{V_T}{Q_{LODO}} \leftrightarrow V_T = Q_{LODO} \cdot TRS$$

Onde:

TRS: Tempo de retenção de sólidos (dias)

V_T : volume total do digestor (m^3)

Q_{LODO} : Vazão afluyente de lodo adensado (m^3 lodo adensado/dia)

4.3.2 Taxas de Aplicação

A taxa de aplicação de sólidos voláteis (TA_{SV}) foi calculada por meio da seguinte equação (Nuvolari, 2003):

$$TA_{SV} = \frac{L_{SV}}{V_T}$$

Onde:

TA_{SV} : Taxa de aplicação de sólidos voláteis ($kgSV/m^3 \cdot d$);

V_T : volume total do digestor (m^3);

L_{SV} : carga de sólidos voláteis afluyente ($kgSV/d$).

Já a taxa volumétrica per capita (TV_{PC}) foi calculada utilizando-se a seguinte expressão (Nuvolari, 2003):

$$TV_{PC} = \frac{V_T}{População}$$

Onde:

V_T : volume total do digestor (m^3);

TV_{PC} : taxa volumétrica per capita ($m^3/hab.$).

4.3.3 Demais dimensões

No cálculo do volume do digestor, levou-se em conta também o volume do cone de fundo, gerando então o volume útil de digestão.

$$V_{CONE} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h$$

Onde:

V_{CONE} : volume do cone (m^3);

D: diâmetro da base circular (m);

h: altura do cone (m).

Todas as demais dimensões do digestor deram-se a partir do volume útil de digestão. Além disso, vale ressaltar que a configuração do digestor também considerou a disponibilidade de área na ETE Insular.

4.4 Estimativas da produção de metano e de biogás

A taxa de geração de metano pode ser estimada a partir das equações cinéticas da digestão anaeróbia (Appels et al., 2008). São elas:

$$P_X = \frac{Y \cdot E \cdot S_0}{1 + K_d \cdot TRS}$$

$$V_{CH_4} = 0,35 \cdot (ES_0) - 1,42P_X$$

Onde:

P_X : massa líquida de produção celular (kg/d);

Y: coeficiente de rendimento (0,04-0,1mgSSV/mgDBOu utilizada);

E: eficiência de utilização do lodo (0,6 a 0,9);

S_0 : carga de DBOu afluyente (kg/d);

K_d : coeficiente de decaimento (d^{-1});

TRS: tempo de retenção de sólidos (dias);

'1,42': fator de conversão de material celular em DBO;

V_{CH_4} : volume de metano produzido sob 0°C e 1atm ($m^3 CH_4/d$).

A produção de biogás, gerada através da digestão anaeróbia do lodo adensado, será estimada utilizando-se a seguinte equação (METCALF & EDDY, 2003):

$$\frac{V_{CH_4}}{V_{BIOGÁS}} = 0,65 \leftrightarrow V_{BIOGÁS} = \frac{0,65}{V_{CH_4}}$$

Onde:

V_{CH_4} : volume de metano produzido sob 0°C e 1atm (m³ CH₄/d),

$V_{BIOGÁS}$: volume de metano produzido (m³ biogás/d).

4.5 Quantidade de calor para os digestores

A quantidade de calor necessária para o aquecimento do reator também deverá ser contabilizada. Segundo Appels (2008), a quantidade necessária de energia para aquecer o lodo a temperatura de funcionamento dos digestores pode ser obtida por meio da equação abaixo:

$$Q = M_f \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) + U \cdot A \cdot (T_4 - T_3) \cdot 86,4$$

Onde:

Q: demanda diária de calor do digestor (kJ/d);

M_f : massa de lodo adensado a alimentar o digestor (kg/d);

C_p : calor específico da água (kJ/kg °C);

T_2-T_1 : diferença entre a temperatura do lodo adensado e a temperatura do digestor;

U: coeficiente de transferência de calor (J/s·m²·°C);

A: área da superfície externa do digestor (m²);

T_4-T_3 : diferença entre a temperatura interna do digestor e a temperatura ambiente externa (°C).

O 1º termo da equação fornece a energia necessária para o aquecimento da massa de lodo, enquanto que o 2º termo da equação fornece a energia necessária para manter a temperatura do digestor, considerando assim a perda de calor nas paredes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No capítulo corrente, serão apresentados os resultados obtidos do pré-dimensionamento do digestor anaeróbio, bem como as estimativas de produção de metano e de biogás obtidas.

Vale ressaltar que todos os passos de cálculo encontram-se no apêndice, contendo então neste capítulo 5 somente os resultados comentados.

5.1 Área disponível na ETE

Antes de se realizar o dimensionamento da unidade digestora, fez-se o levantamento da área disponível na ETE, para a construção da referida unidade.

Por meio do software © Google Earth foi possível verificar uma ampla área de 2100m², com medidas de 30m x 70m, localizada entre o sistema de tratamento preliminar e o tratamento biológico (Figura 11).

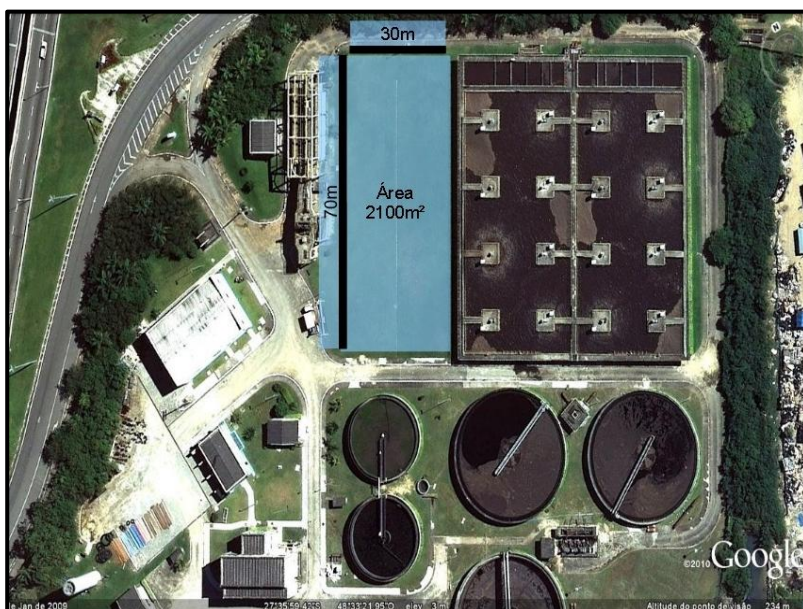


Figura 11: Local disponível para instalação de unidades digestoras de lodo (© Google Earth, 2010).

Por meio da visualização da área disponível e sabendo-se que o

digestor terá formato cilíndrico, verifica-se que seu diâmetro não deve ultrapassar 20m, para que haja uma distância de segurança de, pelo menos 5,00m de cada lado, entre o tratamento preliminar e a unidade digestora, e esta e o tratamento biológico.

5.2 Configuração do sistema de digestão anaeróbia

Por meio dos cálculos, que se encontram no apêndice A, obteve-se duas unidades digestoras de lodo, ambas anaeróbias e de simples estágio e alta taxa, considerando operação sob condições mesofílicas.

As dimensões das duas unidades digestoras cilíndricas de lodo são mostradas na Tabela 9, discriminando os valores calculados e adotados.

Tabela 9: Resultados do pré-dimensionamento do digestor - valores calculados e adotados para uma unidade digestora anaeróbia de lodo.

	Valor calculado	Valor adotado	Unidade
Diâmetro (porção cilíndrica)	15,45	15,00	m
Altura útil de digestão	8,00	8,00	m
Altura de espuma	-	0,70	m
Altura de sobrenadante	-	0,70	m
Altura reservada ao biogás	1,30	1,50	m
Altura do cone	-	2,50	m
Altura total do digestor	13,40	13,40	m
Altura de acúmulo de sólidos	-	1,50	m
Área circular do digestor	176,71	176,71	m ²
Volume preliminar de digestão	1500,00	1500,00	m ³
Volume útil de digestão	1529,17	1529,17	m ³
Inclinação de fundo do cone	-	1V : 3H	m
TRS corrigido para o novo volume (volume útil)	15,68	15,68	dias

O diâmetro foi arredondado para baixo, de 15,45m para 15,00m, em virtude de nesta etapa de cálculo não ter sido contabilizado ainda o volume do cone de fundo. Percebe-se que com a contabilização da parcela do volume de cone que contribui com a digestão anaeróbia

obtém-se um volume útil de digestão de 1529,17m³. Para ilustrar este fato, a Figura 12 mostra parte do cone sendo ocupada por material digerido, enquanto o restante do volume do cone contribui para a digestão do lodo.

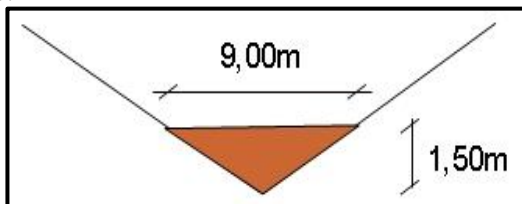


Figura 12: Porção do cone ocupada com lodo digerido e não contabilizada para digestão, enquanto a porção restante contribui para a digestão (parte do volume útil de digestão).

Com relação às alturas de espuma e de sobrenadante, foram adotadas em 0,70m baseando-se em Nuvolari (2003), que utilizou 0,60m para estas alturas, sendo que no caso tratava-se de pré-dimensionamento de um digestor com vazão de lodo afluente de 74m³/dia e TRS=20dias. Nos cálculos do presente pré-dimensionamento a vazão de lodo era de 195m³/dia.

Na fase preliminar do pré-dimensionamento, verificou-se a taxa de aplicação de sólidos voláteis (TA_{SV}) e a taxa volumétrica per capita (TV_{PC}). Os valores obtidos foram os seguintes (Tabela 10).

Tabela 10: TASV e TVPC obtidos na fase de pré-dimensionamento.

TA _{SV}				
Taxa convencional	Alta taxa	Valor calculado	Unidade	Referências
0,64-1,60	2,40-6,40	1,30	kgSV/m³.d	Qasin, 1999
-	1,60-4,80		kgSV/m³.d	Metcalf, 2003
TV _{PC}				
Taxa convencional	Alta taxa	Valor calculado	Unidade	Referências
0,06-0,08	0,02-0,04	0,013	m³ lodo/hab.	Qasin, 1999
-	0,07-0,11		m³ lodo/hab.	Metcalf, 2003

Observa-se que tanto a TA_{SV} como a TV_{PC} resultaram em valores abaixo da faixa de digestores do tipo alta taxa.

Com relação ao TA_{SV} , 1,30 pode ser considerado bastante próximo do limite mínimo de 1,60 para o digestor de alta taxa e, além desta proximidade, torna-se claro que a utilização de um digestor anaeróbio de taxa convencional tornaria o digestor excessivamente grande devido ao aumento do TRS para valores maiores ou iguais a 30 dias. Isto tornaria inviável a construção destas unidades, tanto pelo aspecto estético da localização da ETE em Florianópolis como também pelo aspecto operacional. Além disso, a produção de biogás poderia ficar comprometida devido à falta dos sistemas de mistura e aquecimento.

Com relação ao TV_{PC} (0,013), vale lembrar que a população utilizada para o cálculo foi a população de projeto, ou seja, 225.000 hab. Este fato provavelmente influenciou no resultado, tornando o TV_{PC} bastante baixo, inferior inclusive a faixa dos digestores tipo taxa convencional.

Com relação ao sistema de mistura, deve-se adotar misturadores por recirculação do próprio gás. Isso porque tais misturadores consomem menos energia e são mais fáceis de serem operados, quando comparados com outros tipos de misturadores, como os sistemas externos de bombeamento ou misturadores mecânicos (Nuvolari, 2003).

5.3 Produção teórica de biogás e energia

De posse do dimensionamento, procedeu-se então a estimativa teórica de produção de biogás.

A produção teórica estimada de biogás e de metano, por dia e por mês, estão discriminadas na Tabela 11. Para o detalhamento das etapas de cálculo, ver apêndice B.

Tabela 11: Produção teórica de gás metano e de biogás, em m^3/d e $m^3/mês$.

Produção de gás metano		Produção de biogás	
m^3/d	$m^3/mês$	m^3/d	$m^3/mês$
1.288,12	38.643,55	1.981,72	59.451,61

Considerando que o biogás possua 65% de metano e que o poder calorífico do biogás nestas condições seja de $22,4 MJ/m^3$ (Metcalf & Eddy, 2003), obteve-se a energia do biogás (Tabela 12).

Tabela 12: Energia do biogás, em MJ/d, MJ/mês e kWh/mês.

Energia do biogás		
MJ/d	MJ/mês	kWh/mês
44.390,53	1.331.716,04	370.217,06

Vale ressaltar que para o cálculo da produção de biogás, utilizou-se uma eficiência de 60% de conversão de sólidos. Segundo a literatura, QASIN (1999) diz que deve-se usar uma eficiência entre 60% e 90%.

5.4 Quantidade de calor para os digestores

De posse do pré-dimensionamento já efetuado e afim de se dar maior realidade ao balanço de energia no digestor, calculou-se também a quantidade de calor que deve ser fornecida para que o lodo em digestão esteja a uma temperatura de 35°C.

A Tabela 13: Baixa insulação, alta insulação e insulação adotada. mostra a insulação segundo a literatura e a insulação adotada para o cálculo da perda de energia.

Tabela 13: Baixa insulação, alta insulação e insulação adotada.

Baixa insulação	Alta insulação	Insulação adotada	Unidade
3,0-5,0	2,0-3,0	3,0	J/s·m ² ·°C

Assim sendo, obteve-se uma energia de aquecimento necessária no valor de 32.841,21MJ/d, o que resulta em uma 273.895,69 kWh/mês.

5.5 Balanço energético no digestor

Para fins de balanço energético e de massa no digestor, foram calculadas os elementos afluentes ao digestor (Tabela 14), os elementos em digestão (Tabela 15) e os elementos efluentes ao digestor (Tabela 16). Vale lembrar que não foi contabilizada a energia necessária para o sistema de mistura e as perdas na conversão da energia química do biogás em energia elétrica. Para estes cálculos, segundo Andreoli (2001), o poder calorífico do lodo bruto é de 20MJ/kgST e o poder calorífico do lodo digerido é de 12MJ/kgST.

Tabela 14: Elementos afluentes para balanço energético e de massa.

Parâmetro	Valor obtido	Unidade
$L_{SV,A} =$	3.901,11	kgSV/d
$L_{ST,A} =$	5.362,50	kgST/d
$E_{LODO\ BRUTO,A} =$	107.250,0	MJ/d
$Q_{LODO,A} =$	195,0	m³ lodo adensado/d

Tabela 15: Elementos presentes na unidade de digestão para balanço energético e de massa.

Parâmetro	Valor obtido	Unidade
$E_{AQUEC} =$	32.841,21	MJ/d
$SV_{CONVERT} =$	2.340,67	kgSV convertidos

Tabela 16: Elementos efluentes para balanço energético e de massa

Parâmetro	Valor obtido	Unidade
$E_{BIOGÁS,E} =$	44.390,53	MJ/d
$E_{BIOGÁS\ DISPONÍVEL,E} =$	11.549,32	MJ/d
$V_{BIOGÁS,E} =$	1.981,72	m³ biogás/d
$L_{ST,E} =$	3.021,83	kgSTdigeridos/d
$E_{LODO\ DIGERIDO} =$	36.261,98	MJ/d

A Figura 13 apresenta esquematicamente o balanço de massa para a digestão anaeróbia de lodo estimada neste trabalho.

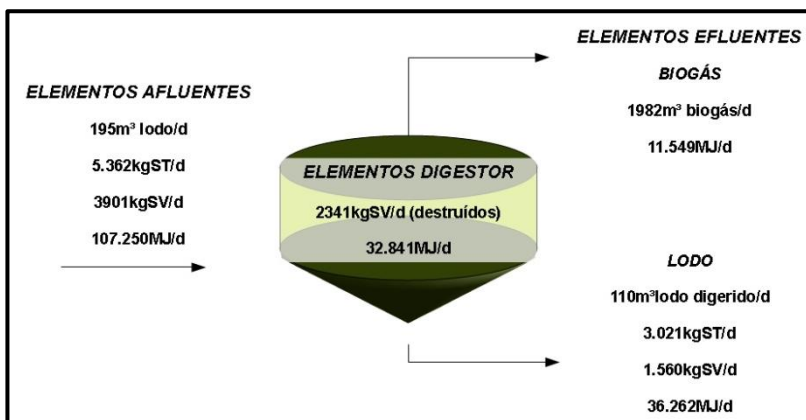


Figura 13: Balanço energético e de massa para o conjunto de dois digestores anaeróbios de simples estágio e alta taxa, mesofílicos e operando em paralelo.

Por meio do balanço de massa apresentado é possível verificar uma redução no volume de lodo de 85 m³, ou seja, dos 195m³ de lodo afluyente que entram no digestor, aproximadamente 110m³ de lodo seguem para a próxima etapa do tratamento, que é o desaguamento. Os 85m³ transformam-se em biogás e em sobrenadantes que devem retornar ao tratamento da fase líquida dos esgotos.

Com relação à energia, sabe-se que a ETE consome em média 845.514MJ/mês e que a energia disponível de biogás, descontado-se a energia necessária para o aquecimento, é de 346.480MJ/mês é possível alimentar em parte ou no todo o sistema de mistura.

Vale lembrar que nos cálculos não foram contabilizados a quantidade de energia necessária para o sistema de mistura do lodo nos dois digestores e que há uma perda significativa na conversão da energia química do biogás em energia elétrica.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os dados operacionais da ETE Insular e por meio da metodologia proposta foi possível dimensionar um digestor anaeróbio, em escala real e sob condições mesofílicas, servindo como alternativa de tratamento para a estabilização do lodo. A unidade anaeróbia a ser instalada deve incluir dois digestores com as seguintes dimensões: diâmetro de 15,0m e altura total de 13,40m.

Com relação aos objetivos específicos estabelecidos, pode-se concluir que:

- A redução em volume do lodo adensado após o tratamento com o digestor anaeróbio mesofílico de alta taxa e simples estágio pré-dimensionado foi de 85,12m³/d, ou seja, uma redução de aproximadamente 44% no volume de lodo adensado afluente, que é de 195m³ lodo adensado/d.
- O ganho energético do biogás gerado foi de 11.549,32MJ/d, ressaltando que não foram contabilizados nos cálculos a energia necessária para o sistema de mistura e a perda de energia no momento da conversão que ocorre por meio da queima de biogás e conseqüente geração de energia elétrica.

Como recomendação para futuros trabalhos, sugere-se a estimativa dos gastos de energia para o sistema de mistura e bombeamento do digestor anaeróbio mesofílico.

Por fim, é interessante o levantamento do custo econômico, tanto de implantação como de operação destas unidades de estabilização de lodo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, R. G. C. M. **Tratamento e Valorização de Dejetos da Suinocultura Através de Processos Anaeróbios – Operação e Avaliação de Diversos Reatores em Escala Real**. 170f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

ANDREOLI, C.V. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final** – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6. Cleverson V. Andreoli, Marcos von Sperling, Fernando Fernandes. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte/MG. Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

APPELS, Lise et al. **Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge**. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34, 755-781, 2008.

BELLI FILHO, P. **Stockage et odeurs des dejections animales, cas du lisier de porc**. Thèse de Doctorat de L'Université de Rennes I. France, 250 p., 1995.

BOLZONELLA, David et al. **Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process**. *Process Biochemistry*, 40, 1453-1460, 2005.

BRASIL. Lei Federal 11.445/2007, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. José Roberto Campos (coordenador). -- Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464p.

CHERNICHARO, C.A. de L. **Reatores Anaeróbios** – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

EPA – Environmental Protection Agency. **Land application of biossolids** – Process design manual. Cincinnati, 1993.

FRANÇA, Milene. **Avaliação da biodegradabilidade e da disponibilidade do lodo de esgoto anaeróbio termohidrolisado pelo uso de biogás**. Dissertação. Florianópolis, 2002.

GAVALA et al. **Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge** – Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*. 37, 4561–4572, 2003.

KHANAL, S.K. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and application**. 2008. 308p.

LETTINGA, G.; VAN HAANDEL, A. C. (1994) Tratamento Anaeróbio de Esgotos. Um manual para regiões de clima quente. UFPB.

LUDUVICE, Maurício. Processo de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, Cleverson Vitório. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias** – Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2001, p. 123-157.

McCARTY, P. L. **Anaerobic waste treatment fundamentals**. Public Works, 95, 9, 107-112; 10, 123-126; 11, 91-94; 12, 95-99 (September-December); 1964.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and reuse**. 4ª Ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MORAES, L. M. PAULA JUNIOR, Durval Rodrigues de. **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de lodos de esgoto provenientes de reatores anaeróbios sequenciais**. Boletim Técnico da FATEC-SP - BT/ 24 – pág. 47 a 51 – Maio / 2008.

MORIN, P.; MARCOS, B.; MORESOLI, C.; LAFLAMME, C. B. **Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada**. *Applied Energy*. n. 83, p. 275-283, 2010.

NUVOLARI, Ariovaldo. (Org.). Esgoto Sanitário: Coleta, Transporte, Tratamento e Reuso Agrícola. São Paulo: Blucher, 2003. 520 p.

O'ROURKE, J. T. **Kinetics of Anaerobic Treatment at Reduced Temperatures**. Tese. Stanford University, Califórnia – 1968.

PARKYN, Gene F. OWEN, Willian F. **Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges**. *Journal of Environmental Engineering*. Vol.112, nº 5, Março, 1987.

PELCZAR JR., J.M.; CHAN, E.C.S.; KRIEG, Noel R. **Microbiologia: conceitos e aplicações**. v.1, 2ª ed., São Paulo: Makron Books, 1997.

PINTO, Marcelo Antônio Teixeira. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, Cleverson Vitório. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias** – Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2001. p. 261-297.

PROSAB. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Cleverson Vitório Andreoli (coordenador). Rio de Janeiro – ABES, 2001.

QASIN, Syed R. **Wastewater Treatment Plants – Planing, Design and Operation**. 2ª Ed. Technomic Pub, 1999.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos**. Brasília, 2008.

SOUSA, Cláudio Arcanjo de. **Tratamento termofílico aeróbio de efluente de máquina de papel utilizando biorreator a membranas**. 2008. 143 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

US-EPA (U. S. Environmental Protection Agency). **Technologies for upgrading Existing and Designing New Drinking Water Treatment Facilities**. Office Drinking Water, 1980.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos** – Princípios do tratamento biológico de águas

residuárias, v.1. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental,
Belo Horizonte/MG, 2000.

ANEXOS

ANEXO A

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo

Ativado

Pós Gradeamento

Data	pH	DBO mg/L	DQO mg/L	Sulfeto ug/L	Sulfato mg/L	ST mg/L	SS mg/L	SSd mL/L	SD mg/L
6/jan	7,16	420,0	450	964	72,9	756	144	3,0	612
20/jan	7,26	451,0	472	2035	74,8	608	144	6,5	464
3/fev	7,11	421,0	592	3550	57,1	541	192	4,0	349
17/fev	7,35	294,5	352	1100	70,6	785	92	1,5	693
3/mar	6,27	359,0	452	2535	56,2	587	164	4,0	423
17/mar	-	320,0	474	1910	68,9	763	180	4,0	583
30/mar	7,14	149,0	394	884	54,6	502	212	2,0	290
12/abr	6,65	375,0	524	1688	60,2	539	180	4,0	359
27/abr	8,01	238,5	323	184	67,9	452	116	2,5	336

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas**Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo****Ativado****Pós Gradeamento**

Data	pH	DBO mg/L	DQO mg/L	Sulfeto ug/L	Sulfato mg/L	ST mg/L	SS mg/L	SSd mL/L	SD mg/L
12/mai	7,98	135,0	256	107	48,1	307	84	2,5	223
1/jun	7,53	300,0	528	1176	66,4	612	128	6,0	484
16/jun	7,69	400,0	492	1155	54,2	556	220	5,0	336
29/jun	5,95	-	577	998	60,0	594	276	7,5	318
15/jul	7,97	380,0	535	664	65,5	1039	116	5,0	923
29/jul	7,85	410,0	566	1004	48,4	636	188	5,5	448
10/ago	8,24	370,0	518	658	67,6	973	168	5,0	805
23/ago	7,81	416,0	540	-	-	650	300	9,0	350
Média	7	340	473	1288	62	641	171	5	470
Dpad	1	92	91	854	8	175	57	2	187

ANEXO B

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado

Tanque de Denitrificação 1

Amostra Nº	Data	Hora da Coleta	Temperatura °C		Chuva S/N	pH	Alc. Total mg CaCO ₃ /L	OD mg/L
10	6/jan	10:10	29,5	27,9	S	6,90	152,2	0,64
49	20/jan	10:10	29,0	28,3	N	6,87	185,1	0,56
88	3/fev	10:07	30,0	29,2	N	7,22	184,5	0,80
129	17/fev	9:25	25,0	27,5	N	7,32	141,0	0,64
175	3/mar	9:34	23,2	26,9	N	6,30	199,2	0,48
197	17/mar	10:25	26,0	27,1	N	-	-	0,42
213	30/mar	9:40	24,0	26,5	S	7,00	180,2	1,01
263	12/abr	10:30	21,0	24,6	N	-	-	0,64
293	27/abr	9:35	21,3	23,7	N	7,81	152,4	0,42
347	12/mai	9:35	17,0	20,6	S	7,50	92,6	0,65

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado

Tanque de Denitrificação 1

Amostra Nº	Data	Hora da Coleta	Temperatura °C		Chuva S/N	pH	Alc. Total mg CaCO ₃ /L	OD mg/L
421	1/jun	10:10	16,0	22,3	N	7,14	185,0	0,36
474	16/jun	9:50	18,9	21,7	N	7,26	190,1	0,30
510	29/jun	9:24	18,0	22,1	N	7,65	94,5	0,84
592	15/jul	10:20	14,0	20,5	N	7,37	157,6	0,71
644	29/jul	9:40	18,0	21,2	N	7,43	193,2	0,48
669	10/ago	9:43	16,5	19,6	N	7,36	195,8	1,02
704	23/ago	10:45	23,0	21,2	N	7,44	225,3	1,14
Coletas	Média	-	21,8	24,2	-	7,24	168,6	0,65
17	Dpad	-	4,8	3,1	-	0,35	36,1	0,24

ANEXO C

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado

Tanque de Denitrificação 2

Amostra Nº	Data	Hora da Coleta	Temperatura °C		Chuva S/N	pH	Alc. Total mg CaCO ₃ /L	OD mg/L
11	6/jan	10:00	29,5	27,9	S	7,10	158,7	0,62
50	20/jan	10:00	29,0	28,0	N	6,92	200,6	0,56
89	3/fev	10:15	30,0	29,4	N	7,28	190,0	0,73
130	17/fev	9:32	25,0	27,7	N	6,43	124,8	0,59
176	3/mar	9:37	23,2	27,2	N	6,97	194,2	0,42
198	17/mar	10:30	26,0	27,0	N	-	-	0,51
214	30/mar	9:50	24,0	26,3	S	6,82	169,1	0,96
264	14/abr	10:25	21,0	24,7	N	-	-	0,55
294	27/abr	9:30	21,3	23,9	N	7,97	157,2	0,42
348	12/mai	9:40	17,0	20,7	S	7,73	93,2	0,63

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado

Tanque de Denitrificação 2

Amostra	Data	Hora da	Temperatura °C		Chuva	pH	Alc. Total	OD
Nº		Coleta	Ar	Amostra	S/N		mg CaCO ₃ /L	mg/L
422	1/jun	10:00	16,0	22,3	N	7,06	191,0	0,39
475	16/jun	9:55	18,9	21,8	N	7,38	174,2	0,25
511	29/jun	9:29	18,0	22,1	N	7,65	233,8	0,83
593	15/jul	10:25	14,0	20,5	N	7,31	162,5	0,78
645	29/jul	9:43	18,0	21,3	N	7,41	200,3	0,50
670	10/ago	9:48	16,5	19,8	N	7,30	199,9	1,04
705	23/ago	10:50	23,0	21,2	N	7,50	206,8	1,17
Coletas	Média	-	21,8	24,2	-	7,26	177,1	0,64
17	Dpad	-	4,8	3,1	-	0,38	33,8	0,24

ANEXO D

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado

Tanque de Aeração 1

Data	pH	OD mg/L	ST mg/L	SS mg/L	SSF mg/L	SSV mg/L	SSd mL/L	SD mg/L	IVL mL/g
6/jan	6,51	0,77	3596	3136	508	2628	940	460	299,7
20/jan	6,83	0,68	3454	3064	724	2340	930	390	303,5
3/fev	7,24	0,87	4248	3176	1020	2156	980	1072	308,6
17/fev	6,50	0,54	5392	3468	676	2792	995	1924	286,9
3/mar	6,50	1,57	4446	3024	208	2816	980	1422	324,1
17/mar	-	1,14	8454	2520	296	2224	980	5934	388,9
30/mar	6,31	1,19	3865	3016	728	2288	1000	849	331,6
14/abr	6,94	1,26	2788	2580	348	2232	1000	208	387,6
27/abr	7,80	2,43	2193	1760	552	1208	980	433	556,8
1/jun	6,76	0,86	5467	2800	736	2064	960	2667	342,9

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado

Tanque de Aeração 1

Data	pH	OD mg/L	ST mg/L	SS mg/L	SSF mg/L	SSV mg/L	SSd mL/L	SD mg/L	IVL mL/g
16/jun	6,97	0,68	3291	2764	704	2060	980	527	354,6
29/jun	7,44	1,28	2803	2164	276	1888	220	639	101,7
15/jul	6,96	3,10	9663	3888	996	2892	930	5775	239,2
29/jul	7,25	0,70	4628	3592	812	2780	930	1036	258,9
10/ago	7,29	1,08	5122	3460	860	2600	950	1662	274,6
23/ago	7,58	1,24	3184	2872			960	312	334,3
Média	6,99	1,21	4537	2955	630	2331	920	1582	318,4
Dpad	0,42	0,66	1954	521	248	431	182	1740	89,9

ANEXO E

**Laboratório de Análises Físico-químicas e
Hidrobiológicas
Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado
Tanque de Aeração2**

Data	pH	OD mg/L	ST mg/L	SS mg/L	SSF mg/L	SSV mg/L	SSd mL/L	SD mg/L	IVL mL/g
6/jan	6,37	0,71	3535	3192	388	2804	920	343	288,2
20/jan	6,80	0,65	3531	2960	736	2224	930	571	314,2
3/fev	7,10	0,84	4132	3188	944	2244	950	944	298,0
17/fev	6,94	0,59	5378	3656	736	2920	995	1722	272,2
3/mar	6,63	1,56	4430	3032	104	2928	980	1398	323,2
17/mar	-	0,85	8640	2464	320	2144	970	6176	393,7
30/mar	6,34	1,17	3588	2896	416	2480	1000	692	345,3
14/abr	7,01	1,65	2740	2552	524	2028	1000	188	391,8
27/abr	7,23	0,51	-	-	-	1000			
12/mai									

**Laboratório de Análises Físico-químicas e
Hidrobiológicas**
Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado
Tanque de Aeração2

Data	pH	OD mg/L	ST mg/L	SS mg/L	SSF mg/L	SSV mg/L	SSd mL/L	SD mg/L	IVL mL/g
1/jun	6,74	0,75	5505	2844	696	2148	990	2661	103,4
16/jun	7,06	0,79	2937	2764	664	2100	990	173	358,2
29/jun	8,41	1,69	2674	2012	228	1784	210	662	104,4
15/jul	6,94	2,24	8756	3812	1036	2776	900	4944	236,1
29/jul	7,21	0,67	4159	3700	600	3100	950	459	256,8
10/ago	7,15	1,22	5050	3160	740	2420	960	1890	507,9
23/ago	7,45	1,31	3752	3252			990	500	304,4
Média	7,03	1,08	4587,1	3032,3	580,9	2435,7	920,9	1555	299,8
Dpad	0,48	0,48	1818,7	467,8	256,4	389,6	186,0	1726	100,1

ANEXO F

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado

Tanque de Água de Serviço - Efluente Final

Data	pH	OD mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	P Total mg/L	Sulfeto ug/L	Sulfato mg/L	ST mg/L	SS mg/L	SSd mL/L	SD mg/L
6/jan	6,45	4,15	20,0	22,3	-	8,0	64,3	362	7,2	0,0	355
20/jan	7,58	3,84	-	34,8	-	29,0	75,6	426	6,0	0,0	420
3/fev	7,69	3,55	29,0	38,7	-	13,0	143,2	-	9,0	0,0	-
17/fev	7,49	4,75	57,0	158,7	0,7	8,0	260,5	1991	2,5	0,0	1989
3/mar	7,20	2,41	-	49,4	0,6	6,0	242,5	1685	8,0	0,0	1677,0
17/mar	-	4,34	20,0	47,0	19,0	15,0	834,0	6211	2,0	0,0	6209,0
30/mar	7,19	3,55	-	24,4	ND	14,0	130,6	874	2,5	0,0	871,5
12/abr	7,28	3,06	31,5	33,2	3,7	13,0	67,0	364	2,6	0,0	361,4
27/abr	7,95	2,99	43,0	24,1	0,0	10,0	66,7	392	4,5	0,0	387,5
12/mai	7,32	9,08	13,5	1,4	14,1	25,0	51,4	280	8,0	0,0	272,0

Laboratório de Análises Físico-químicas e Hidrobiológicas

Monitoramento 2010 - ETE Insular - Lodo Ativado

Tanque de Água de Serviço - Efluente Final

Data	pH	OD mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	P Total mg/L	Sulfeto ug/L	Sulfato mg/L	ST mg/L	SS mg/L	SSd mL/L	SD mg/L
1/jun	7,10	3,31	9,0	26,5	6,3	7,0	301,0	2317	9,0	0,0	2308,0
16/jun	7,35	3,04	-	35,2	ND	23,0	68,1	297	20,0	0,0	277,0
29/jun	7,41	3,15	-	35,9	0,7	22,0	60,3	454	40,0	0,0	414,0
15/jul	6,94	3,95	9,0	50,9	19,9	12,0	126,4	5074	12,0	0,0	5062,0
29/jul	7,98	2,35	64,0	31,5	2,0	11,0	89,4	796	14,6	0,3	781,4
10/ago	8,00	3,19	45,0	24,8	1,4	10,0	145,6	1441	3,0	0,0	1438,0
23/ago	7,82	4,54	79,5	38,5	2,9	-	-	339	18,0	0,0	321,0
Média	7,42	3,84	35,0	39,8	5,9	14,1	170,4	1456	9,9	0,0	1446,4
Dpad	0,40	1,47	22,0	31,9	7,1	6,7	187,2	1716	9,2	0,1	1718,3

ANEXO G

Mês	Lodo prensado (m ³)
dez/08	848,0
jan/09	780,0
fev/09	512,0
mar/09	560,0
abr/09	496,0
mai/09	486,0
jun/09	695,0
jul/09	657,0
ago/09	951,0
set/09	651,0
out/09	784,0
nov/09	744,0
dez/09	880,0
jan/10	901,0
fev/10	897,0
mar/10	785,0
abr/10	814,0

Mês	Lodo prensado (m ³)
mai/10	697,0
jun/10	615,0
jul/10	610,0
ago/10	865,0
set/10	1067,0
MÉDIA	740,7
DESVIO PADRÃO	157,3
MÁXIMO	1067,0

DADOS		
C _{ST} =	2,75	%

$$concentração(\%) = \frac{concentração(mg / L)}{10000}$$

C _{ST} =	27500	mgST/L
C _{ST} =	27,50	kgST/m ³
C _{SV} =	20,01	kgSV/m ³
L _{SV} =	3901,11	kgSV/d

$V_{\text{adensador}}=$	992,35	m^3
$Q_{\text{bomba}}=$	15,00	m^3/h
$t_{\text{funcionamento}}=$	13,00	h/d
$Q_{\text{lodo}}=$	195,00	$\text{m}^3 \text{ de lodo adensado/dia}$

APÊNDICES

APÊNDICE A: PASSOS DE CÁLCULO DO PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Pré-dimensionamento do digester anaeróbio de lodo, simples estágio e alta taxa

Considerações básicas

- ▶ 2 Digestores anaeróbios
- ▶ Simples estágio e alta taxa
- ▶ Condições mesofílicas (T em torno de 35°C)
- ▶ Inclinação do cone de fundo (CHERNICHARO, 2007):

Horizontal=	3,0	m
Vertical=	1,0	m

Dados

Q_{ETE} =	25.920,00	m ³ /d
Q_{ETE} =	25.920.000,00	L/d
Q_{ETE} =	300,00	L/s
Q_{LODO} =	195,00	m ³ lodo adens/d
C_{ST} =	27,50	kg/m ³
L_{SV} =	3901,11	kg/m ³
P_{proj} =	225.000	hab.

► TRS sugeridos p/ DAs de mistura completa e mesofilia
(teoria de prod. Biogás)

Temperatura °C	TRS - mínimo d	TRS - desejável d
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

Fonte: McCarty (1968).

► TRS sugeridos p/ o PROJETO de DAs de mistura completa e mesofilia

	Valor	Unidade
TRS (Metcalf & Eddy, 2003)	15-20	d
TRS (Qasin, 1999)	10-20	d

TRS= **15** d

► Coeficiente de decaimento sugerido p/ projeto (K_d)

Kd	Valor		Unidade
	Faixa	Típico	
Fermentação	0,02-0,06	0,04	g/g·d
Metanogênese	0,01-0,04	0,02	g/g·d
Total combinado	0,02-0,04	0,03	g/g·d

Fonte: adaptado de Metcalf & Eddy (2003).

$$K_d = 0,03 \text{ d}$$

► Coeficiente de crescimento celular (Y)

Produção de sólidos	Valor		Unidade
	Faixa	Típico	
Fermentação	0,06-0,12	0,10	kgSSV/kgDBO
Metanogênese	0,02-0,06	0,04	kgSSV/kgDBO
Total combinado	0,05-0,10	0,08	kgSSV/kgDBO

Fonte: adaptado de Metcalf & Eddy (2003).

$$Y = 0,08 \text{ kgSSV/kgDBO}$$

► Cálculo da capacidade dos digestores

$$TRS = \frac{V_T}{Q_{LODO}} \Leftrightarrow V_T = Q_{LODO} \cdot TRS$$

$V_T =$	2925,00	m³ lodo adens/d
$V_T =$	3000,00	m³ lodo adens/d
$V_{UNID} =$	1500,00	m³ lodo adens/d

► Taxa de aplicação de sólidos voláteis (TA_{SV})

$$TA_{SV} = \frac{L_{SV}}{V_T}$$

Taxa convencional	Alta taxa	Unidade	
0,64-1,60	2,40-6,40	kgSV/m³·d	Qasin
-	1,60-4,80	kgSV/m³·d	Metcalf

$$TA_{SV} = \quad \mathbf{1,30} \quad \text{kgSV/m}^3 \cdot \text{d}$$

► Taxa volumétrica per capita (TV_{pc})

$$TV_{PC} = \frac{V_T}{P_{proj}}$$

Taxa convencional	Alta taxa	
0,06-0,08	0,02-0,04	Nuvolari (adap. de Qasin)
	0,07-0,11	Metcalf

$$TV_{PC} = \mathbf{0,013} \quad m^3 \text{ lodo adens/hab}$$

Os valores de TA_{SV} e TV_{PC} indicam que a carga de sólidos não é tão elevada para ser tratada nos 2 digestores de 1500m³ cada um. Além disso, como se quer o biogás, será utilizado digestor de alta taxa com sistema de mistura e aquecimento.

► Dimensões de um digestor

Altura de espuma (H_{ESC})

$$H_{ESC} = \mathbf{0,70} \quad m$$

Altura de espuma (H_{SOBREN})

$$H_{SOBREN} = \mathbf{0,70} \quad m$$

Altura útil ($H_{\text{ÚTIL}}$)

$$H_{\text{ÚTIL}} = 8,00 \text{ m}$$

Área (desconsiderando o V_{CONE})

$$A_{\text{DIG}} = 187,50 \text{ m}^2$$

Diâmetro (D)

$$D = 15,45 \text{ m}$$

$$D = 15,00 \text{ m}$$

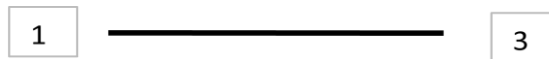
Área (corrigida)

$$A_{\text{DIG}} = 176,71 \text{ m}^2$$

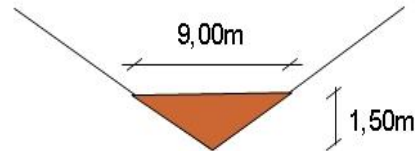
Volume útil ($V_{\text{útil}}$)

$$V_{\text{ÚTIL}} = 1413,72 \text{ m}^3$$

Inclinação do fundo do cone (1:3 - adotado, CHERNICHARO)



$$\begin{aligned} h &= 2,50 \text{ m} \\ g &= 7,91 \text{ m} \end{aligned}$$



Volume cone de fundo (V_{CONE})

$$V_{\text{CONE}} = 147,26 \text{ m}^3$$

Parte do cone é destinada ao acúmulo de lodo digerido: 1,5m de altura (adotado)

$$\begin{aligned} h_{\text{ACÚM. SÓLIDOS}} &= 1,50 \text{ m} \\ D_{\text{ACÚM. SÓLIDOS}} &= 9,00 \text{ m} \\ V_{\text{ACÚM}} &= 31,81 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volume útil corrigido ($V_{\text{ÚTIL CORRIG}}$)

$$\begin{aligned} V_{\text{ÚTIL CORRIG.}} &= 1529,17 \quad \text{m}^3 \\ \text{TRS}_{\text{RESULTANTE}} &= 15,68 \quad \text{d} \end{aligned}$$

Volume reservado ao biogás (15% do volume reservado a digestão - ANDREOLI, 2001)

$$\begin{aligned} V_{\text{BIOGÁS NO DIGESTOR}} &= 229,38 \quad \text{m}^3 \\ H_{\text{BIOGÁS NO DIGESTOR}} &= 1,30 \quad \text{m} \\ H_{\text{BIOGÁS NO DIGESTOR}} &= 1,50 \quad \text{m} \\ H_{\text{TOTAL,DIGESTOR}} &= 13,40 \quad \text{m} \end{aligned}$$

APÊNDICE B: PASSOS DE CÁLCULO DE ESTIMATIVA DE BIOGÁS E REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Estimativa da produção de gás metano e de gás total - reaproveitamento energético e redução em volume

► Dados

$$1kWh = 3,6MJ \Leftrightarrow 1MJ = 0,278kWh$$

E=	0,60			
P _{CALORÍFICO BIOGÁS} =	22,4	MJ/m ³		
P _{CALORÍFICO METANO} =				
Consumo _{ETE, MENSAL} =	234.865	kWh/mês	845.514	MJ/mês
Consumo _{ETE, MENSAL} =	7.829	kWh/d	28.183,8	MJ/d
T _{méd, Florianópolis} =	20,5	°C		
T _{méd, Digestor} =	35,0	°C		
Q _{ETE} =	25.920,0	m ³ /d		
TRS _{RESULTANTE} =	15,68	d		
Y=	0,08	kgSSV/kgDBO		

► **Determinação da carga de DBO**

($S_0 = LDBO_{REMOV}$)

$$DBO_{REMOV} = DBO_{IN} - DBO_{OUT}$$

$DBO_{REMOV} = 305$ mg/L

$DBO_{REMOV} = 0,305$ kgDBO/m³

$S_0 = LDBO_{REMOV} = 7902,90$ kgDBO/d

► **Determinação da carga volumétrica**

($LDBO_V$)

$$LDBO_V = \frac{LDBO_{REMOV}}{V_T}$$

$LDBO_{REMOV} = 2,58$ kgDBO/m³·d

► Cálculo da quantidade de sólidos voláteis produzidos por dia (P_X)

$$S = S_0 \cdot (1 - E)$$

$$S = 3161,16 \text{ kgDBO/m}^3 \cdot \text{d}$$

$$P_X = \frac{Y \cdot (S_0 - S)}{1 + K_d \cdot TRS}$$

$$P_X = 261,61 \text{ kg/d}$$

► Porcentagem de estabilização (%Estab)

$$\% Estab = \frac{(S_0 - S) - 1,42 \cdot P_X}{S_0}$$

$$\% Estab = 55,30\%$$

► Cálculo da quantidade de gás metano produzido por dia em mesofilia (V_{CH_4})



T= 35,00 °C
FC= 0,35 °C

$$V_{CH_4} = 0,35 \cdot (S_0 - S) - 1,42 \cdot P_X$$

V_{CH_4} = 1288,12 m³ CH₄/d
 V_{CH_4} = 38643,55 m³ CH₄/mês

► Cálculo da quantidade de biogás (V_{CH_4})

$$\frac{V_{CH_4}}{V_{biogás}} = 0,65 \Leftrightarrow V_{biogás} = \frac{V_{CH_4}}{0,65}$$

$V_{\text{BIOGÁS}}=$	1.981,72	m ³ biogás/d
$V_{\text{BIOGÁS}}=$	59.451,61	m ³ biogás/mês

Composição típica do biogás

Gás	% (volume/volume)
Metano	62-70
Gás carbônico	30-38
Gás sulfídrico	50ppm-3000ppm
Nitrogênio	0,05-1,0
Oxigênio	0,022
Hidrogênio	<0,01
Vapor d'água	Saturação

Fonte: ANDREOLI, 2001.

► Energia do biogás

$E_{\text{BIOGÁS}}=$	44.390,53	MJ/d
$E_{\text{BIOGÁS}}=$	1.331.716,04	MJ/mês
$E_{\text{BIOGÁS}}=$	370.217,06	kWh/mês

► Cálculo da quantidade de calor requerida
(ANDREOLI, 2001).

$$H(kJ/d) = U \cdot A_L \cdot \Delta T_2 \cdot 864$$

	Baixa insulação	Alta insulação	Unidade
U	3-5	2-3	J/s·m²·°C
			Fonte: Andreoli, 2001.

U= **3,0** J/s·m²·°C

$$A_L = A_{Lcilindro} + A_{Lcone} + A_{Tampão}$$

$A_{LCILINDRO}$ =	631,5	m²
A_{LCONE} =	186,3	m²
$A_{LTAMPÃO}$ =	176,7	m²
A_L =	994,4	m²

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = 15,3 \quad ^\circ\text{C}$$

$$H = 3.930,9 \quad \text{MJ/d}$$

$$E_{aquec} (kJ/d) = M_f \cdot C_p \cdot \Delta T_1 + H$$

Mf=	195000	kg/d
Cp=	4,20	kJ/kg.°C
ΔT_1 =	14,5	°C
U=	2,50E-06	MJ/s.m².°C
A _{LATERAL} =	304,08	m²
ΔT_2 =	14,50	°C
H=	3.930,9	MJ/d
E _{AQUEC} =	32.841,21	MJ/d
E _{BIOGÁS DISPONÍVEL,E} =	11.549,32	MJ/d
E _{BIOGÁS DISPONÍVEL,E} =	346.479,74	MJ/mês
E _{BIOGÁS DISPONÍVEL,E} =	96.321,37	kWh/mês

► Balanço de energia nos digestores

Valores adotados:

Poder calorífico do lodo bruto=	20	MJ/kgST
Poder calorífico do lodo digerido=	12	MJ/kgST

Elementos afluentes

$L_{SV,A} =$	3.901,11	kgSV/d
$L_{ST,A} =$	5.362,50	kgST/d
$E_{LODO\ BRUTO,A} =$	107.250,00	MJ/d
$Q_{LODO,A} =$	195,00	m ³ lodo adensado/d

Elementos digestor

$E_{AQUEC} =$	32.841,21	MJ/d
$SV_{CONVERT} =$	2.340,67	kgSV convertidos

Elementos efluentes

$E_{BIOGÁS,E} =$	44.390,53	MJ/d	
$E_{BIOGÁS\ DISPONÍVEL,E} =$	11.549,32	MJ/d	346.479,74 MJ/mês
$V_{BIOGÁS,E} =$	1.981,72	m ³ biogás/d	
$L_{ST,E} =$	3.021,83	kgSTdigeridos/d	
$E_{LODO\ DIGERIDO} =$	36.261,98	MJ/d	

195		5362,5
Vlodo digerido		3997,1

$V_{\text{LODO DIGERIDO}} = 109,9 \text{ m}^3$
 Redução em volume = 85,12 m³